

Otto Karhu

ILMANVAIHTOKONEEN TIIVIYS- LUOKITUKSEN VAIKUTUS ENERGIA- ANKULUTUKSEEN ELINKAAREN AI- KANA

Opinnäytetyö
Talotekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Tekijä/Tekijät

Otto Karhu

Tutkinto

Insinööri (AMK)

Aika

Toukokuu 2017

Opinnäytetyön nimi

Ilmanvaihtokoneen tiiviysluokituksen vaikutus
energiankulutukseen elinkaaren aikana

36 sivua
10 liitesivua

Toimeksiantaja

AT-Air Oy

Ohjaaja

Heikki Salomaa

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin ilmanvaihtokoneen tiiviysluokituksen vaikutusta energiankulutukseen tämän elinkaaren aikana. Ilmanvaihtokoneet jaotellaan kolmeen eri luokkaan niiden vaipan ilmanpitävyyden perusteella. Tiiviysluokitukset määrittelevät suurimman sallitun vuotoilmamäärän vaippaneliötä kohden. Työssä vertailtiin esimerkkikohteesta tehtyjen laskujen perusteella näitä kolmea eri tiiviysluokkaa keskenään ja selvitettiin, kuinka suuri ero on energiankulutuksessa.

Ilmanvaihtokoneen vaipan läpi vuotavan ilman määrä riippuu koneen sisällä olevasta paineesta sekä vaipan pinta-alasta. Ilmanvaihtokoneen energiankulutus muodostuu pääasiassa puhaltimen sähköenergiankulutuksesta sekä lämmityspatterin lämpöenergiankulutuksesta. Muita mahdollisesti energiaa kulututtavia komponentteja ovat jäähdytyspatteri sekä kostutin.

Ilmanvaihdon energiankulutukseen vaikuttaa olennaisesti, säädetäänkö kiinteistössä ilmavirtoja käyttöasteen mukaan, jolloin ilmanvaihtoa pienennetään hiljaisina aikoina. Muita energiankulutusta vähentäviä asioita ovat puhaltimen pieni SFP-luku sekä pois-toilman lämmöntalteenoton korkea hyötysuhde.

Työssä tutkittu esimerkkikohde on Etelä-Suomessa sijaitseva koulurakennus, jossa on kymmenen tilaajan toimittamaa ilmanvaihtokonetta. Koneista kuusi on varustettu pyörivällä lämmöntalteenotolla ja neljä vesi-glykoli-lämmöntalteenotolla. Ilmavirtaa ei säädellä käyttöasteen mukaan. Suoritettujen laskujen perusteella tiiveimmässä L1-luokassa energiaa menee vuosittain hukkaan 847 kWh, L2-luokassa 2540 kWh ja L3-luokassa 7620 kWh.

Työstä saatujen tulosten perusteella tiiviillä ilmanvaihtokoneella voidaan saavuttaa varsin merkittäviä säästöjä. Tulevaisuudessa energiamääräykset todennäköisesti tiukkenevat sekä energian hinta tulee nousemaan. Energian hinnan nousu tarkoittaa sitä, että elinkaaren aikana pelkästään tiiviillä vaipalla saavutetut säästöt voivat nousta vielä huomattavasti suuremmiksi.

Asiasanat

ilmanvaihto, tiiviys, luokitus, energiansäästö

Author (authors)	Degree	Time
Otto Karhu	Bachelor of Building Services Engineering	May 2017

Thesis Title	
Air leakage classifications impact for the energy consumption of an air handling unit during its life cycle	36 pages 10 pages of appendices

Commissioned by
AT-Air Oy

Supervisor
Heikki Salomaa

Abstract

The objective of the thesis was to examine the impact of air leakage classifications for the energy consumption of an air handling unit during its life cycle. Air handling units can be divided to three different leakage classes depending on their leakage rate. The amount of air leakage through the chamber is depending on the pressure inside the air handling unit and the area of the chamber. The objective was to compare these different leakage classes and find out if there is any energy saving potential there.

Calculations of this thesis are based on a school building in Southern Finland. There are ten air handling units in that school. Airflows remain constant (CAV) all the time. Calculations show that the energy losses via air leakage through the chamber in leakage classification L1 are 847 kWh over one-year period. The losses are 2540 kWh/a in a leakage classification L2 and 7620 kWh/a in a classification L3. Air handling unit's energy consumption is mainly based on fans electric energy consumption and heat energy consumption of heating coil.

The results of the thesis indicate that there is potential for energy savings via compact chamber of the air handling unit. Energy requirements will probably tighten in the near future. Energy prices also seem to keep on rising. That means that there is more savings to be made in the future just by having a compact cabinet in air handling unit.

Keywords

ventilation, leakage, classification, energy, consumption

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	ILMANVAIHTOKONEEN TIIVIYS.....	6
2.1	Tiiviysluokitukset.....	6
2.2	Tiiviyskoe.....	9
3	IV-KONE.....	10
3.1	Puhallin.....	11
3.1.1	SFP-luku	12
3.2	Lämmityspatteri	13
3.3	Jäähdytyspatteri.....	14
3.4	Lämmöntalteenotto	15
4	LASKUT.....	16
4.1	Vuotoilmamäärät tiiviysluokittain.....	17
4.2	Vaipan pinta-ala.....	18
4.3	Sähköenergiankulutus	20
4.4	Lämmitysenergiankulutus	22
4.5	Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutus	24
5	ESIMERKKIKOHDE	27
6	VUOTOILMAN AIHEUTTAMAT MUUT HAITAT.....	29
6.1	Muiden kanavaosien tiiviys	30
6.2	Melu.....	31
6.3	Epäpuhtaudet	32
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
	LÄHTEET.....	36

LIITTEET

Liite 1. Lämpötilojen pysyvyysskäyrästä

Liite 2. Ilmanvaihtokoneiden laskentatulokset

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon vuosittain hukataan energiaa IV-koneen vaipan läpi vuotoilman mukana. Erilaiset tavat säästää energiaa ovat hyvin tärkeässä roolissa nykyaikaisessa rakentamisessa. Tulevaisuudessa todennäköisesti energiamääräysten kiristyessä ja hintojen noustessa kaikki säästöt tulevat tarpeeseen. Opinnäytetyön tarkoituksena on pohdita, kannattaako ilmanvaihtokoneen vaipan tiiviyyteen panostaa vertailemalla eri tiiviysluokissa hukkaan menevää energiaa ilmanvaihtokoneen elinkaaren aikana.

Työni tilaajana toimiva AT-Air Oy tuo Suomeen AL-KO:n ilmanvaihtokoneita. AL-KO on saksalainen yritys, joka valmistaa ajoneuvotekniikkaa, puutarhalaitteita ja ilmastointiteknologiaa. Ilmanvaihtokoneita valmistetaan eri vaipan tiiviysluokissa ja AL-KO:n ilmanvaihtokoneiden tiiviysluokat ovat peräisin standardista EN 1886:2007. Alla olevassa kuvassa on esitelty nämä eri tiiviysluokat sekä suurin mahdollinen vuotoilmamäärä vaippaneliötä kohden tiiviysluokittain 700 Pa:n koepaineessa. AL-KO Thermin AT4/AT4-F-ilmanvaihtokoneita valmistetaan ainoastaan tiiviysluokkaan L1, muita heidän koneitaan on myös muissa kuvan tiiviysluokissa.

Table 5 — Casing air leakage classes of air handling units, 700 Pa positive test pressure

Leakage class of casing	Maximum leakage rate (q_{700}) $l \times s^{-1} \times m^{-2}$
L1	0,22
L2	0,63
L3	1,90
NOTE Class L1 for units for special application e.g. cleanrooms.	

Kuva 1. IV-koneiden tiiviysluokat ja vuotoilmamäärät standardissa EN 1886:2007

Vuotoilman mukana hukkaan menevää energiaa selvitetessä tulee huomioda se, että pelkästään IV-koneessa ilma esiintyy useassa eri lämpötilassa. Tämän takia vuotoilma on ”eri arvoista” riippuen siitä, missä kohdassa IV-konetta se vuotaa. Raitisilmapuolella, ennen lämmityspatteria, vuotanut ilma ei kuormita kuin tuloilmapuolen puhallinta, sillä ilmaa ei ole vielä käsitelty. Tällöin ainoa haittapuoli energiankulutuksen kannalta on se, että puhallin joutuu pu-

haltamaan enemmän ilmaa IV-koneeseen, osan kadotessa matkalla. Mikäli vuoto tapahtuu aivan IV-koneen loppupuolella, lämmityspatterin jälkeen, karannut ilma on huomattavasti kalliimpaa, sillä sitä on ehditty jo käsittelemään. Tämän takia työn laskentavaiheessa tulee tietää, kuinka käsiteltyä ilmaa on missäkin vaiheessa ilmanvaihtokonetta.

Perehdyn opinnäytetyössäni tarkemmin aiheeseen liittyviin viranomais määräyksiin sekä ilmanvaihtokoneeseen ja niihin IV-koneen osiin, jotka ovat oleellisessa asemassa, kun pohditaan vuotoilman mukana hukkaan menevää energiaa. Näitä osia ovat tulo- ja poistoilmahuollin, lämmitys- ja jäähdytyspatteri sekä lämmöntalteenotto. Työn oleellisin osuus on vertailulaskenta eri tiiviysluokkien välillä esimerkkitilanteesta, jona toimii koulurakennus Etelä-Suomessa. Laskennan avulla saadaan konkreettisia vastauksia siihen, kannattaako IV-koneen valinnassa panostaa vaipan tiiviyteen vai ovatko energiasäästöt mitättömän pieniä. Lisäksi työssä pohditaan muiden kanavaosien tiiviyden vaikutusta ilmanvaihtokoneella saatuihin hyötyihin sekä muita vuotoilman mukana lisääntyviä haittavaikutuksia.

2 ILMANVAIHTOKONEEN TIIVIYS

Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D2 sekä erilaiset standardit asettavat jonkin verran vaatimuksia, jotka laitevalmistajien tulee läpäistä saadakseen toimittaa IV-koneita Suomeen. Rakennusmääräyskokoelman osan D2 määräykset pohjautuvat standardiin EN 1886:1998, joka on vanhempi versio johdannossa mainitusta EN 1886:2007 standardista. Standardien välillä on siis pieniä eroavaisuuksia, mutta luokkien suurimmat sallitut vuotoilmamäärät ja laskukaavat ovat samat. Seuraavissa kappaleissa on käyty tarkemmin läpi IV-koneiden tiiviysluokitukset, sekä niiden testaamiselle asetetut vaatimukset. Lisäksi selvitetään, kuinka johdannossa standardin EN 1887:2007 tiiviysluokitukset vertautuvat Suomen rakennusmääräyskokoelman vastaaviin.

2.1 Tiiviysluokitukset

Ilmanvaihtokoneen tulee täyttää Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 ohjeissa esitetyt sekä tyyppihyväksyntäohjeissa esitetyt vaatimukset seuraavien ominaisuuksien osalta: vaipan tiiviys, vaipan paineenkestävyys, liitok-

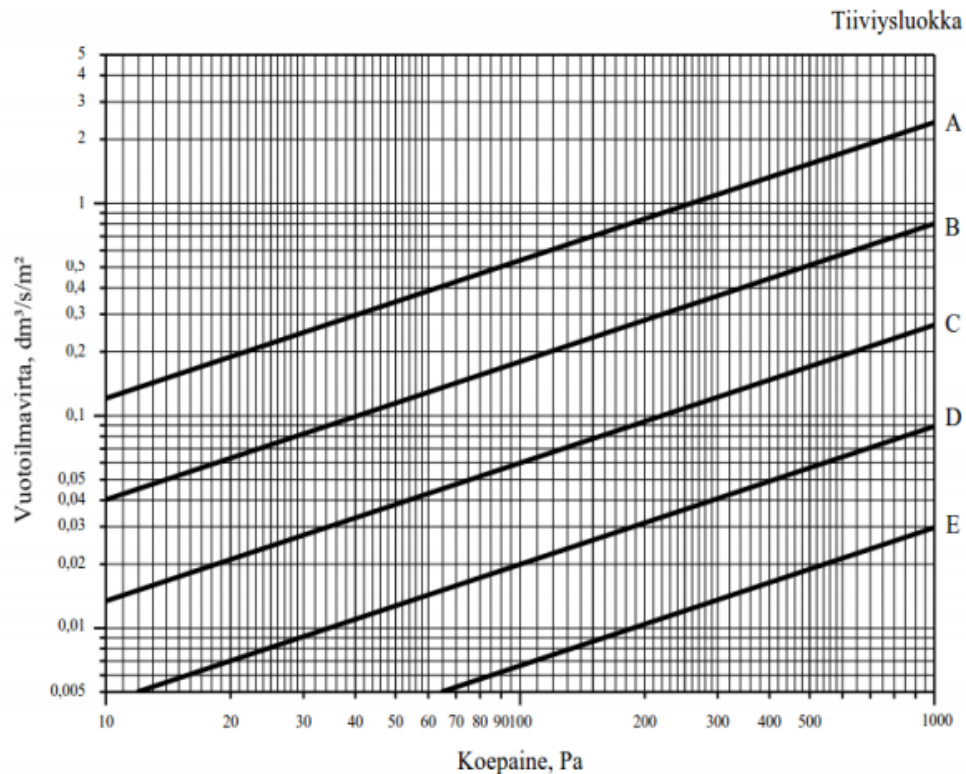
sen tiiviys, suodattimen ohivuoto, lämmöntalteenotto-osan tulo- ja poistopuolen välinen vuoto. Tässä opinnäytetyössä keskitytään vaipan tiiviyteen ja vuotoilmavirtaan, joten alle on kasattu aiheesta löytyviä eri viranomaismääräyksiä. [1, s. 74.]

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D2 ei juurikaan käsitellä IV-koneen tiiviyttä. Määräyksen kohdassa 3.7.1.3 sanotaan seuraavasti: ”Ilmanvaihtokone on yleensä riittävän tiivis, kun se on vaipan tiiviydeltään vähintään tiiviysluokkaa A ja vuotoilmavirta tulo- ja poistopuolen välillä on enintään 6 % ilmanvaihtokoneen nimellisilmavirrasta koepaineella 300 Pa”. [2, s. 16.]

Standardissa SFS-EN 1886 kohdassa 3.3 käsitellään hieman tarkemmin IV-koneiden tiiviyttä ja paineenkestävyyttä. Siellä on mainittu seuraavat asiat: ”Ilmankäsittelykoneen vaipan on kestettävä sallitun maksimipaineen (= suurin sallittu käyttöpaine), kuitenkin vähintään ± 1600 Pa:n koepaineen (yli /alipaine), aiheuttama kuormitus tiiviyden heikentymättä asetetusta tiiviysluokkavaatimuksesta. Paineenkestävyyskoe tehdään ennen vaipan tiiviyskoetta. Vuotoilman tilavuusvirta poistoilmapuolelta tuloilmapuolelle mitataan standardin SFS-EN 308 mukaisesti. Ilmankäsittelykoneen vaipan vuotoilman tilavuusvirta mitataan standardin SFS-EN 1886 mukaisesti. Ilmankäsittelykoneen vaippapinta-ala lasketaan ulkomittojen mukaan. Vaippapinta-alaan ei lasketa kanavaliitosten aukkoja.” [3, s. 4.]

Tiiviysluokka	Sallittu vuotoilma q_{VL} $\text{dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$
A	$0,027 \times p_s^{0,65}$
B	$0,009 \times p_s^{0,65}$
C	$0,003 \times p_s^{0,65}$
D	$0,001 \times p_s^{0,65}$
E	$0,0003 \times p_s^{0,65}$

Kuva 2. Tiiviysluokitukset (Suomen rakennusmääräyskokoelma D2)



Kuva 3. Tiiviysluokitukset (Suomen rakennusmääräyskokoelma D2)

Yllä olevista kuvaajista pystytään selvittämään vuotoilmavirta vaipan läpi eri tiiviysluokissa, kun tiedetään testauksessa käytetty koepaine. Rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan vähimmäisvaatimuksena ilmanvaihtokoneille voidaan pitää tiiviysluokkaa A. Käytännössä vähimmäistiiviysluokkana voidaan pitää luokkaa L2 (vastaa tiiviysluokkaa B). [4, s.164.]

Johdannossa kuvassa 1 on esiteltynä AL-KO:n IV-koneiden tiiviysluokitukset. Taulukossa on esitelty vuotoilmavirrat kolmelle eri luokalle 700 Pa:n koepaineessa. Jotta jatkossa pystytään vertailemaan eri luokkien välisiä eroja energiankulutuksessa, tulee vuotoilmavirrat pystyä laskemaan missä tahansa paineessa. Todellisuudessa paineet ovat pienemmät, jolloin myös vuotoilmavirta on pienempi, kuten näemme kuvasta 3. AL-KO:n tiiviysluokat L1, L2 ja L3 vastaavat D2:essa esitetty tiiviysluokkia A, B ja C niin, että L1 on sama kuin C, L2 on sama kuin B ja L3 on sama kuin A. Tämä pystytään toteamaan sijoittamalla kuvassa 2 esitettyihin kaavoihin koepaineeksi 700 Pa, jolloin saadaan samat sallitut vuotoilmamäärät kuin AL-KO:n taulukossa.

2.2 Tiiviyskoe

Ilmanvaihtokoneille tehtävistä tiiviyskokeista on annettu D2:ssa myös niukasti ohjeita, kuten tiiviysluokituksista. Rakennusmääräyskokoelman kohdassa 4.1.1.5 sanotaan seuraavasti: ”Jos tiiviysluokan A tai sitä paremman tiiviysluokan laadultaan testattu ja valvottu ilmanvaihtokone toimitetaan yhtenä kokonaisuutena tai paloina siten, että työkohteessa tehdään enintään kaksi liitosta tuloilmapuolella ja/tai kaksi liitosta poistoilmapuolella, ei työkohteessa tarvitse tehdä tiiviyskoea. Muille tiiviysluokan A tai sitä paremman tiiviysluokan laadultaan testatuille ja valvotuille ilmanvaihtokoneille tehdään tiiviyskoe pistokokeena. Kokeiden laajuus on 20 % ilmanvaihtokoneista kuitenkin vähintään yksi ilmanvaihtokone.” [2, s. 22.]

Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että suurimmissa osissa työmaita tiiviyskokeita suoritetaan vain yhdelle IV-koneelle tai mikäli kohteessa on useampia IV-koneita, niin joka viidennelle. Laitevalmistajien tekemiä tiiviyskokeita voi pitää varsin luotettavina, mutta työmaalla korostuu väistämättä koneiden oikeaoppinen käsittely ja asentaminen, jotta saadaan haluttu lopputulos. Opinäytetyön loppupuolella on käsitelty muiden osa-alueiden, kuten oikeaoppisen asennustavan vaikutusta tutkittavaan aiheeseen, joten siellä on vielä avattu aihetta hieman lisää.

Standardissa EN 1886:2007 on määrätty, että tiiviyskoe tulee tehdä paineenkestävyyskokeen jälkeen. Ensin ilmanvaihtokone altistetaan -400 Pa:n alipaineeseen, jolloin mitataan vuotoilmamäärä. Vuotoilmamäärä ei saa ylittää koneen tiiviysluokan suurinta sallittua arvoa (kuva 2, koepaineeksi 400 Pa). Tämän jälkeen koepaine vaihdetaan 700 Pa:n ylipaineeksi ja mitataan vuotoilmamäärä. Tulosta vertaillaan jälleen eri tiiviysluokkien suurimpiin sallittuihin arvoihin. [5.]

Yhdysvaltalainen Price Industries on julkaissut oman tutkielmansa ilmanvaihtokoneiden vuotoilmasta. Siinä on kuvailtu tiiviyskokeet hyvin samalla tavalla kuin Suomen rakennusmääräyskokoelmassa. Suurin osa tiiviyskokeista suoritetaan tehtaalla, sillä tarvittavien testausvälineiden toimittaminen työmaalle ja siellä testaaminen ovat hyvin hankalaa. Tilaajalla on oikeus valvoa tiiviyskoea, mutta mikäli hän ei ole paikalla, tulee tulokset kirjata ylös. Mikäli kohte-

seen tulee useampia IV-koneita, testataan näistä vain osa. [6, s. 6.]

Samassa Price Industriesin tutkielmassa on käyty läpi puhaltimen sijainnin merkitystä tiiviyskokeen suorittamisessa. Mikäli puhallin sijaitsee virtaussuunnassa viimeisenä, suoritetaan painekoe alipaineessa. Mikäli puhallin sijaitsee keskellä IV-konetta, vaihtelee painesuhteet koneen sisällä yli- ja alipaineen välillä. Tällöin standardin EN1886 mukaan ilmanvaihtokoneen molemmat osat tulisi testata erillään. Tällä varmistetaan se, että ilmanvaihtokone toimii parhaalla mahdollisella tavalla, sillä osille saadaan laitettua eri paineet. [6, s.6.]

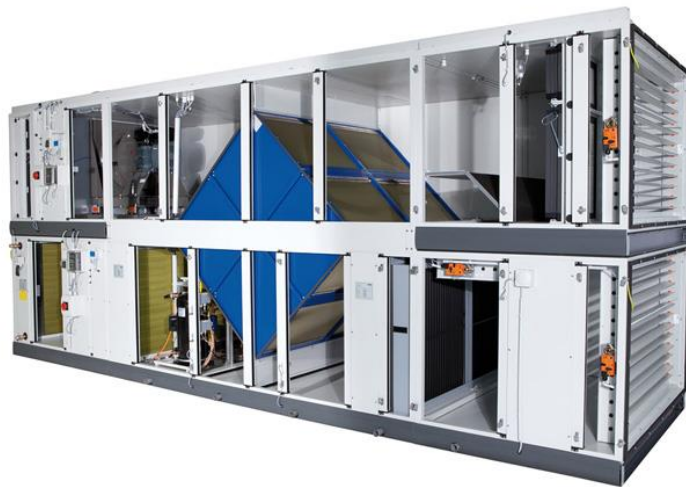
3 IV-KONE

Mietittäessä ilmanvaihtokoneen vaipan tiiveyden vaikutusta energiankulutukseen, on hyvä käydä lyhyesti läpi eri komponentit, jotka sijaitsevat vaipan sisäpuolella. Rakennusten ilmanvaihdossa käytetään lähes poikkeuksetta tehdasvalmisteisia ns. koteloituja koneita. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki ilman käsittelyssä tarvittavat komponentit sijaitsevat vakioimittaisen lämpöeristetyin kotelon sisällä. Koteloituja komponentteja liitetään moduuleina yhteen haluttujen ilmankäsittelytoimintojen mukaan. [4, s.164.]

Kotelon poikkipinnan koon määrittää pitkälti tarvittava ilmavirta, sillä ilman nopeuden tulee pysyä noin 2 m/s:n alueella. Tehdasvalmisteisien koteloitujen ilmapuhaltuslaitteiden ilmavirta-alue kattaa ilmavirran noin väliltä 0,5 – 25 m³/s. Sisäinen poikkipinta-ala on vastaavasti välillä 0,6 m * 0,3 m – 3,6 m * 2,4 m. Yleisin ulkovaipan materiaali on sinkitty teräslevy, joka kestää hyvin vähäisen korroosion olosuhteissa, kuten kuivassa konehuoneessa. Muita materiaalivaihtoehtoja ovat mm. alusinkki sekä ruostumaton teräs tai pinnoitettu vaippa, kuten pulverimaalaus. Opinnäytetyön ilmanvaihdonkoneet on pulverimaalattuja. [4, s.164.]

Koteloidut ilmankäsittelykoneet pyritään valmistamaan suurempina kokonaisuuksina kuin jokainen toiminto-osa omana erillisenä osanaan. Tällöin asennustyö vähenee, eikä työmaalla tarvitse tehdä niin paljon osien välisiä liitoksia. Tämä tarkoittaa sitä, että IV-koneen tiiviys paranee ja koneen kokonaispituus pienenee liitosten määrän vähentyessä. [4, s.165.]

Ilmanvaihtokoneen rakennetta on vaikea määritellä, sillä ne vaihtelevat käyttökohteesta ja ilmankäsittelytarpeesta johtuen varsin paljon. Yleisimmin ilmanvaihtokoneen osat ilman virtaussuunnasta lukien ovat: ulkosäleikkö, ulkoilmapelti, suodatin, lämmöntalteenottopatteri, puhallin, lämmityspatteri, jäähdytyspatteri, kostutusosa, äänenvaimennin ja kanavisto. Käyn pikaisesti läpi puhaltimen, lämmitys- ja jäähdytyspatterin sekä lämmöntalteenoton rakenteen ja toimintaperiaatteen, sillä nämä ovat oleellisia osia tutkittaessa vuotoilman mukana hukkaan menevää energiaa.



Kuva 4. IV-kone

3.1 Puhallin

Puhaltimen lisääntynyt sähköenergiankulutus on suurin yksittäinen haitta, mikä aiheutuu IV-koneen vaipan vuotoilmasta energianäkökulmasta. Vaipan läpi vuotanut ilma tarkoittaa sitä, että puhallin joutuu tekemään lisää työtä korvataksaan tämän vuotaneen ilman. Puhallinta voidaan pitää ilmankäsittelyjärjestelmän tärkeimpänä osana, sillä se pitää huolen, että ilma liikkuu IV-koneelta aina huoneisiin asti.

Puhaltimen tärkeimmät osat ovat moottori ja siipipyörä. Siipipyörän pyöriessä, tekevät siivet työtä ilmaan niin, että ilman virtausnopeus ja paine kasvavat. Puhaltimen kehittämä paineenkorotus vastaa aina ilmavirran kanavistossa aiheuttamaa painehäviötä, eli puhallin asettuu aina automaattisesti tasapainotilaan kanaviston kanssa. Puhaltimien haluttu ilmavirta asetellaan muuttamalla puhaltimen pyörimisnopeutta. Tämä tehdään joko valitsemalla hihnakäytön

välityssuhde sopivaksi tai säätämällä moottorin pyörimisnopeutta taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajilla saadaan aikaiseksi täysin portaaton säätö, mikä ei ole mahdollista hihnapyörien halkaisijaa muuttamalla. [4, s. 174.]

Puhallinmoottoreita on pääasiassa kolmea eri tyyppiä: oikosulkumoottoreita, EC-moottoreita ja PM-moottoreita. Puhaltimia on taas oikeastaan vain kammiopuhaltimia tai kaavullisia radiaalipuhaltimia. Kammiopuhaltimen etuna on se, että puhallinpyörä on asennettu suoraan moottorin akselille, mistä seuraa useita etuja kaavulliseen radiaalipuhaltimeen verrattuna. Kammiopuhaltimessa ei ole hihnäkäyttöä, josta irtoaa kumipölyä. Tämän ja sen avoimen rakenteen takia se on hygieenisempi ja helpommin huollettava ja puhdistettava kuin kaavullinen radiaalipuhallin. Kammiopuhallin vaatii käytännössä aina taajuusmuuttajasäädön. Kaavullinen radiaattoripuhallin oli ennen kammiopuhaltimien yleistymistä suosituin ja käytännössä ainoa puhallintyyppi. Sen etuna on kammiopuhallinta korkeampi hyötysuhde ja se sopiikin erittäin hyvin suurille ilmavirroille. [4, s.176.]

3.1.1 SFP-luku

Puhaltimien SFP-luku on se osa-alue, joka on tässä opinnäytetyössä tärkeimmässä asemassa tutkittaessa lisääntyntä sähköenergiankulutusta. SFP on lyhenne englanninkielisistä sanoista Specific Fan Power. SFP-luku kertoo puhaltimen ominaissähkötehon. Sen yksikkö on $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, eli se kertoo, kuinka paljon tarvitaan sähkötehoa yhden kuution siirtämiseen ilmaa. [7, s.1.]

SFP-luvun avulla ohjataan sitä, että toteutettava ilmanvaihtojärjestelmän sähkötehokkuustaso saavuttaa halutun arvon. Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D5 on annettu muutama raja-arvo, joita puhaltimen SFP-luku ei saa ylittää. Koneellisissa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä ominaissähköteho ei saa ylittää arvoa $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ominaissähköteho ei saa ylittää arvoa $1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. [7, s.1.]

Tämän opinnäytetyön laskentavaiheessa SFP-luku on tärkein yksittäinen tekijä selvitetessä vuotoilman mukana hukkaan menevää puhaltimen sähköenergiaa. Laitevalmistaja määrittelee jokaiselle IV-koneen puhaltimelle SFP-arvon. Kertomalla tämä arvo vaipan vuotoilmavirralla saadaan selville puhaltimen

timen hukkaan menevä sähköteho. Laskut on käyty tarkemmin läpi kappaleessa 4.

3.2 Lämmityspatteri

Lämmönsiirtimiä käytetään ilmakehäsäätelyjärjestelmissä ilman lämmittämiseen. Vuotoilman mukana karkaava lämpöenergia muodostaa puhaltimien sähkötehon jälkeen suurimman energiahäviön tässä opinnäytetyössä. IV-koneen ilmanlämmittimenä voi toimia joko vesipatteri tai sähköpatteri, joten käyn molemmat lyhyesti läpi.

Vesipatterien peruseräite on aina melko samanlainen. Patterit tehdään suuresta määrästä ohuita lamelleja, joihin tehdään reiät putkia varten. Reikiin asennetaan putket, joissa virtaava vesi lämmittää patterin läpi kulkevan ilman. Lamellit ovat yleensä alumiinista ja putket kuparista ja lämmönsiirtoaineena voidaan käyttää vettä tai vesi-glykoliliuosta. Lämmityspatterin putket voidaan kytkeä eri tavalla niin, että lämmitysputkissa virtaava neste virtaa eri tavalla suhteessa ilmavirtaan. Näitä erilaisia kytkentätapoja ovat ristivirtauskytkentä, myötävirtakytkentä ja vastavirtakytkentä [8, s.107–108.]

Sähköpattereita on käytössä kahta eri tyyppiä, korkealämpötilarakenne (pintalämpötila noin 300 °C) ja matalalämpötilarakenne (pintalämpötila noin 100 °C). Korkealämpötilapattereissa on sileät lämpövastukset suoraan ilmavirrassa. Matalalämpötilarakenteessa lämpövastukset ovat putkessa ja patterissa on lamellit. [9, s.18.]

Yleisimmin sähkölämmittimen koostuu ryhmästä lämpöelementtejä, jotka on sijoitettu ilmakehäsäätelykoneeseen ilmavirtaan. Elementit kuumenevat, kun niissä kulkee sähkövirta, jolloin lämpö siirtyy ilmaan. Jokainen elementeistä luovuttaa vakiolämpötehon riippumatta ilman lämpötilasta tai ilmavirrasta. Sähkölämmittimellä varustettua ilmakehäsäätelykonetta saa käyttää kuivissa, ei palotai räjähdysvaarallisissa tiloissa ja autotalleissa, joissa ei normaalista käsitellä bensiiniä. Ilman nopeuden lämmittimen otsapinnalla tulee olla yli 1,5 m/s ja lämpötilan lämmittimen jälkeen alle 40 °C. [8, s.115.]

Kappaleessa neljä on käyty tarkemmin laskujen ohessa läpi, kuinka paljon vuotoilmavirran mukana IV-koneen vaipan läpi menee hukkaan lämmitysenergiaa. Opinnäytetyön laskuissa suurin merkittävä tekijä hukkaan menevää lämmitysenergiaa selvittäessä on lämpötilaero, jossa merkittävässä tekijässä on lämmöntalteenotto, mutta myös patterityypillä on merkitystä, kun määritellään energian hintaa.

3.3 Jäähdytyspatteri

Tuloilman jäähdyttäminen ja tämän jäähdytetyn ilman karkaaminen vuotoilman mukana aiheuttaa joissakin IV-koneissa energiankulutuksen kasvamista. Kaikissa kohteissa ei ole tarvetta tuloilman jäähdytykselle, joten energiankulutuksen kannalta kyseessä ei ole yhtä oleellinen asia kuin puhaltimen sähköenergiankulutus tai lämmitysenergiankulutus. Lisäksi jäähdytystarvetta esiintyy vain kesäisin ulkolämpötilan noustessa tietyn raja-arvon yli, joten jäähdytyksen käyttöastekin on huomattavasti pienempi kuin muilla osilla.

Jäähdytykseen tarvittava sähköteho on riippuvainen veden lämpötilasta. Korkeampi lämpötila antaa kylmäkoneelle korkeamman kylmäkertoimen, jolloin jäähdytykseen tarvittava sähköteho pienenee. Normaalisti jäähdytysvesi tuotetaan kompressorikäyttöisellä vedenjäähdyttimellä, jolloin veden lämpötila on tyypillisesti 7 °C sisään ja 12 °C ulos. Mikäli jäähdytys toteutetaan kaukojäähdytyksellä, on myös veden lämpötila korkeampi. Ilmaa voidaan jäähdyttää myös suora höyrystyksellä toimivalla jäähdytyspatterilla, jolloin patteri toimii samalla jäähdytyskoneen höyrystimenä. Jäähdytyskoneessa on tällöin oltava useita tehoportaita, jotta jäähdytystehoa pystytään säätämään ja jäähdytyspatteri on myös jaettava näiden portaiden mukaisesti. Toinen tapa säätää suora höyrystyksellä toimivaa jäähdytyspatteria on käyttää ns. kuumakaasu ohitusventtiiliä. [4, s.172.]

Jäähdytys ja jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutus on varsin pienessä roolissa tässä opinnäytetyössä. Tähän vaikuttaa se, että esimerkkikohteessa ei ole suurta tarvetta jäähdyttää tuloilmaa, joten vain kahdessa IV-koneessa on jäähdytyspatteri. Laskut ja teoria, joiden avulla selvitetään vuotoilman mukana hukkaan menevä jäähdytysenergia, käydään tarkemmin läpi kohdassa 4.5.

3.4 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenoton tehtävänä on hyödyntää poistoilman mukana muuten hukkaan menevää lämpöenergiaa ja lämmittää sillä ulkoa tulevaa raitisilmaa. Lämmöntalteenotto ei kuluta juurikaan energiaa, vaan päinvastoin säästää sitä. Vuotoilman mukana hukkaan menevän lämmitysenergian kannalta sillä on kuitenkin hyvin merkittävä rooli. Mitä korkeammaksi tuloilmaa saadaan lämmöntalteenotolla lämmitettyä, sen vähemmän jää lämmityspatterille lämmitettävää. Tällöin myös vuotoilman mukana karkaava lämmitysenergia on vähäisempää. Opinnäytetyön kannalta tämä tarkoittaa sitä, että huonon hyötysuhteen lämmöntalteenoton omaavissa IV-koneissa vuotoilman mukana karkaa enemmän lämmitysenergiaa. Tällöin vaipan tiiviys korostuu entisestään.

Erilaisia lämmöntalteenottoja ovat pyörivä lämmönsiirrin, levylämmönsiirrin (ristivirta tai vastavirta) ja nestekiertoinen lämmöntalteenotto. Opinnäytetyön esimerkkikohteen ilmanvaihtokoneissa esiintyy näistä kahta, pyörivää lämmönsiirrintä ja nestekiertoista lämmöntalteenottoa.

Pyörivä lämmönsiirrin on eniten käytetty lämmöntalteenottomenetelmä. Sitä pyritäänkin käyttämään aina, kun se on mahdollista tilan vaatimusten ja ilman puhtauden kannalta. Käytettäessä pyörivää lämmönsiirrintä saa siihen yhdistää maksimissaan 5 % luokan 3 poistoilmaa (pääasiassa WC-tilojen poistoilma). Pyörivä lämmönsiirrin soveltuu rakenteeltaan hyvin ilmankäsittelykoneeseen, sillä sen vaatima tilantarve on pieni. Se on myös energiatehokkuuden kannalta paras vaihtoehto. Pyörivällä lämmönsiirtimellä tuloilman jälkilämmitys on hyvin pientä ja suuren osan vuodesta pelkkä lämmöntalteenotto riittää lämmittämiseen. Myös painehäviö on kohtuullinen, jolloin puhaltimen sähkönkulutukseen ei aiheutu suurta kasvua. [4, s. 178.]

Nestekiertoisessa lämmöntalteenotossa lämmön siirtyminen poistoilmasta tuloilmaan tapahtuu väliaineen avulla. Väliaineena toimii lähes aina jokin kiertävä neste. Sekä tulo- että poistoilmapuolella on ilmasta nesteeseen lämmönsiirrin, joka on rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin lämmitys- tai jäähdy-

tyspatteri. Neste lämpenee kulkiessaan poistoilmapatterin kautta, mistä se johdetaan tuloilmapatteriin, jossa neste lämmittää tuloilmaa. Koska tulo- ja poistoilmavirrat on erotettu toisistaan, ei niiden välillä tapahdu minkäänlaista vuotoa. Tämän takia nestekiertoista lämmöntalteenottoa voidaan käyttää hankalissa olosuhteissa. Nestekiertoisen lämmöntalteenoton hyötysuhde on kuitenkin paljon heikompi kuin vaikkapa pyörivällä lämmöntalteenotolla. [4, s.186.]

4 LASKUT

Vuotoilman mukana hukkaan menevästä energiasta osa muodostuu puhaltimien sähkötehon kulutuksesta. IV-koneen käydessä puhaltimet ovat jatkuvasti käynnissä, joten tällöin vuotoilma tulee korvata uudella ilmalla, jotta IV-koneen jälkeen saadaan huoneisiin tarvittava määrä ilmaa. Toinen merkittävä osa-alue on vuotoilman mukana hukkaan mennyt lämmitysenergia. Jokainen IV-kone on varustettu lämmityspattereilla ja Suomessa kesäaikaa lukuun ottamatta ulkoilma on useimmiten niin kylmää, että se tulee lämmittää. Tämän takia lämmityspatterin jälkeen vuotava ilma on energiansäästön kannalta kallimpaa, sillä ilma on tällöin lämmitetty turhaan.

Muita energiakulutuksen kannalta oleellisia asioita ovat hukkaan menevä jäähdytetty tai kostutettu ilma. Toisin kuin puhaltimen tai lämmityspatterin tapauksessa, jokaisessa IV-koneessa ei välttämättä ole tarvetta jäähdyttää tai kostuttaa ilmaa. Tämän takia jäähdytyspatterit ja kostutinosat ovat harvinaisempia, eikä niiden osuus vuotoilman mukana hukkaan menevästä energiasta ole ennakoon ajateltuna yhtä suuri kuin puhaltimien tai lämmityspattereiden.

Yksi merkittävä laskuissa huomioitava asia on se, säädelläänkö kohteen ilmavirtoja käyttöasteen mukaan. Joissakin kiinteistöissä IV-koneet on ohjelmoitu niin, että huoneisiin tuodaan suunnitellut ilmavirrat silloin, kun kohteessa on paljon henkilöitä ja käyttöä. Hiljaisempina aikoina, kun kiinteistö on tyhjiään, tuodaan maksimivirtaamasta vain osa, esimerkiksi 40 %. Näin pyritään säästämään energiankulutuksessa, sillä kiinteistössä ei tarvita niin suurta ilmanvaihtoa, kun henkilöitä ei ole paikalla.

4.1 Vuotoilmamäärät tiiviysluokittain

Ensimmäiseksi vuotoilmamäärän selvittämiseksi tulee sijoittaa kappaleessa 2 kuvassa 2 esitetyt kaavat laskentataulukkoon ja määrittää koepaineen kohdalle oikea painemäärä. Kokonaispaine vaihtelee varsin voimakkaasti koneen eri osien välillä, mutta koska laskenta pohjautuu voimakkaasti teoreettiseen pohjaan, käytetään laskuissa kuvassa 5 näkyvää tulo- ja poistoilmapuolen sisäistä painetta. Sisäinen paine tarkoittaa IV-koneen sisällä olevaa keskimääräistä kokonaispainetta, joten se soveltuu hyvin tämän työn laskenta-arvoksi. Eri paineiden haarukointi osoitti, että paineen vaihtaminen 50 Pascalilla suuntaan tai toiseen aiheuttaa aina vuotoilman mukana hukkaan menevässä energiassa noin 10 % muutoksen. Eli mikäli molemmat paineet olisivat 50 Pascalia pienempiä pienenisi hukkaan menevä energia noin 10 %. Laskuissa käytetään kuitenkin sisäistä painetta, sillä se kuvastaa esimerkkikohteen ilmanvaihtokoneiden todellista painetta.

Koneen tiedot	Ilma sisään		Ilma ulos	
	Asetus	On	Asetus	On
Ilmavirta	0,8000	0,8000 m ³ / s	0,8000	0,8000 m ³ / s
Ulkoinen paine	250	250 Pa	250	250 Pa
Sisäinen paine	552	552 Pa	369	369 Pa
Ilmanopeus		1,9 m / s		1,9 m / s
energia tehokkuus luokka		A		
iv-kone energia tehokkuus luokka		A		
SFP-V (EN 13779 App. D)		1 524 W / (m ³ / s)		

Kuva 5. IV-koneen tekniset tiedot

Tiiviysluokkien suurimmat sallitut vuotoilmamäärät on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D2 ja tämän opinnäytetyön kappaleessa 2. Suomen rakennusmääräyskokoelmassa tutkittavat tiiviysluokat on esitetty kirjaimin A, B ja C ja opinnäytetyön tilaajan toimittamassa standardin EN 1886:2007 taulukossa luokittain L3, L2 ja L1. Tiiviysluokat vertautuivat keskenään niin, että luokka L1 vastaa rakennusmääräyskokoelman luokkaa C, L2 luokkaa B ja L3 luokkaa A. Tässä opinnäytetyössä käytetään tästä eteenpäin tilaajan käyttämiä luokkia L1, L2 ja L3.

Tiiviysluokkien vuotoilmavirrat vaippaneliötä kohden lasketaan kaavoilla:

$$L1 = 0,003 * p_s^{0,65} \quad (1)$$

$$L2 = 0,009 * p_s^{0,65} \quad (2)$$

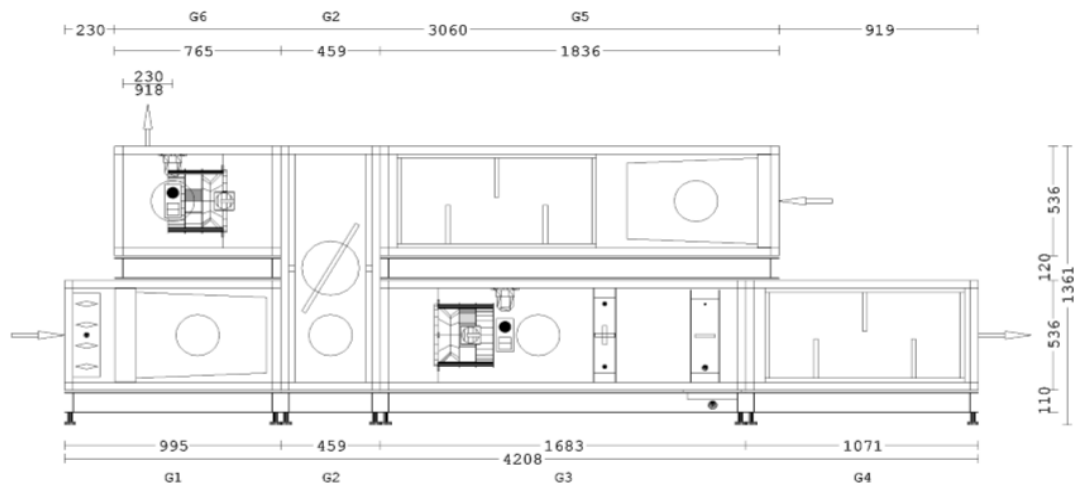
$$L3 = 0,027 * p_s^{0,65} \quad (3)$$

jossa	L	vuotoilmamäärä vaippaneliötä kohden	
			$[\text{dm}^3/\text{s}/\text{m}^2]$
	p_s	sisäinen paine	$[\text{Pa}]$

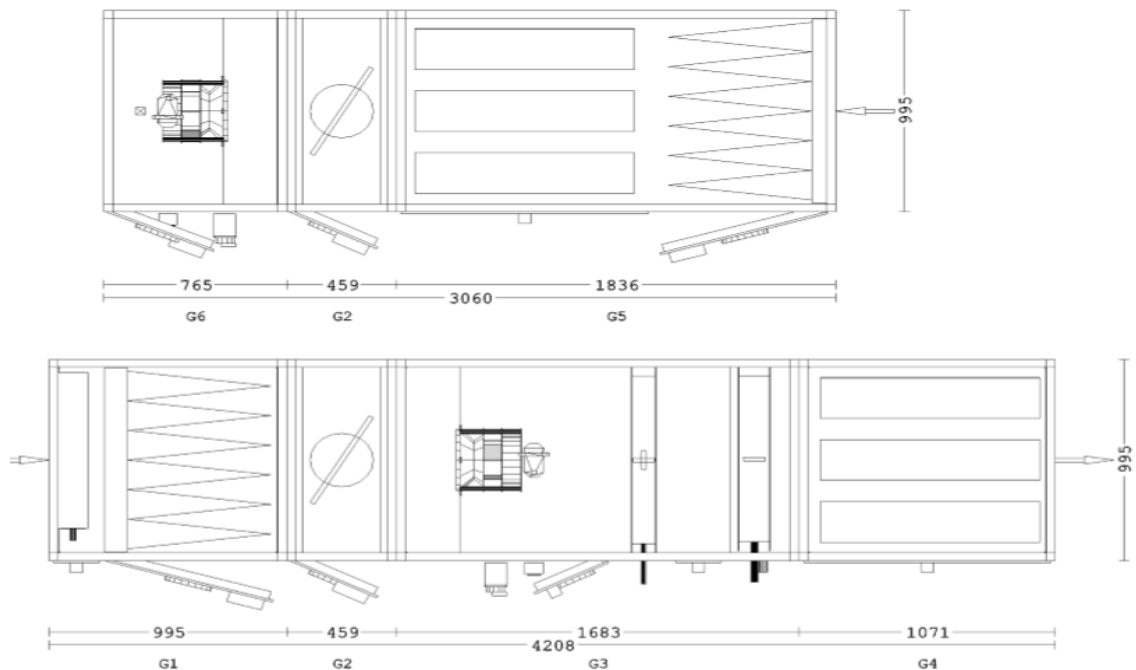
Sijoittamalla ylläoleviin kaavoihin sisäisen paineen kohdalle koneajoista saatu painemäärä saadaan vuotoilmamäärät luokkakohtaisesti vaippaneliötä kohden. Sisäinen paine pysyy jokaisessa luokassa samana, joten ero vuotoilmamäärissä tulee luokkakohtaisesta kertoimesta. Laskuissa tulee ottaa huomioon, että sisäinen paine on eri tulo- ja poistoilmakoneilla, joten vuotoilmamäärät tulee laskea erillään tulo- ja poistoilmapuolella.

4.2 Vaipan pinta-ala

Kuvassa 2 esitetyt eri tiiviysluokkien suurimmat sallitut vuotoilmamäärät on esitetty yksikössä $\text{dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Selvitettäessä vuotoilman määrää tulee tulokset kertoa vaipan pinta-alalla. IV-koneen vaipan pinta-alan laskennasta on aiemmin kerrottu, että se lasketaan ulkomittojen mukaan, eikä vaippapinta-alaan lasketa kanavaliitosten aukkoja. Näiden tietojen avulla vaipan pinta-ala pystytään laskemaan käyttämällä apuna esimerkkituotteen koneajoja.



Kuva 6. IV-koneen pituus ja korkeus



Kuva 7. IV-koneen leveys ja pituus

Yllä olevien kuvien perusteella pystytään laskemaan IV-koneen vaipan pinta-ala. Vaipan pinta-ala kannattaa laskea tulo- ja poistoilmapuolelle erikseen, sillä tuloilmapuoli on yleensä hieman poistoilmapuolta pidempi. IV-koneen vaippa koostuu neljästä sivusta, joista vastakkaiset ovat aina toistensa kanssa saman kokoiset. Useimpien koneiden päistä lähtee kanavaliitokset raitis-, tulo-, poisto- ja jäteilmakanaville, joten nämä ”kulmapalat” jätetään usein laskematta vaipan pinta-alaan standardin SFS-EN 1886 mukaisesti. IV-koneen vaipan pinta-alasta tulee myös vähentää pyörivän LTO:n pinta-ala tulo- ja poistopuhaltimen välistä, sillä siinä kohtaa vaippaa ei varsinaisesti ole ja vuotoa tapahtuu joka tapauksessa. Mikäli laskettavassa koneessa on vesi-glykoli LTO, ei tätä pinta-alaa tarvitse vähentää.

IV-koneen vaipan pinta-ala lasketaan siis kaavalla:

$$A_{vaippa} = 2 * (ab + ac) - A_{LTOp} \quad (4)$$

jossa	A_{vaippa}	vaipan pinta-ala	[m ²]
	a	vaipan pituus	[m]

b	vaipan korkeus	[m]
c	vaipan leveys	[m]
A_{LTOp}	pyörivän LTO:n pinta-ala	[m ²]

Laskettuamme vaipan pinta-alan voimme kertoa sen eri tiiviysluokkien vuotoilmamäärillä, jotka ovat tähän asti olleet yksikössä dm³/s/m². Tällöin yksiköstä poistuu osuus vaipan neliötä kohden, jolloin pystymme laskemaan eri energiankulutuksia. Vaipan pinta-alalla kerrottaessa tulee olla tarkkana, minkä pinta-alan laskuihin valitsee. Esimerkiksi laskettaessa vuotoilman mukana hukkaan menevää lämmitysenergiaa tulee vuotoilmamäärä kertoa lämmityspatterin jälkeisen koneosan pinta-alalla, sillä ilma on lämmitettynä vasta tässä osassa. Puhaltimen sähkönkulutusta laskettaessa huomioidaan koko IV-koneen vaipan pinta-ala, sillä vuoto missä tahansa koneen osassa vaikuttaa puhaltimiin lisääntyneenä työnä.

Esimerkiksi tiiviysluokassa L1 vuotoilmamäärä lasketaan kaavalla:

$$q_{vL1} = L1 * A_{vaippa} \quad (5)$$

jossa	q_{vL1}	vuotoilmamäärä luokassa L1	[dm ³ /s]
	$L1$	vuotoilmamäärä vaippaneliötä kohden	
			[dm ³ /s/m ²]
	A_{vaippa}	vaipan pinta-ala	[m ²]

4.3 Sähköenergiankulutus

Suurin osa vuotoilman mukana hukkaan menevästä energiasta muodostuu puhaltimien lisääntyneestä sähkönkulutuksesta. Vuotoilman siirtämiseen tarvittavan tehon laskeminen on periaatteessa varsin yksinkertainen lasku. Ilmanvaihtokoneen toimittajan tekemistä koneajoista saadaan selville puhaltimen SFP-luku (kuva 5), joka kertoo, kuinka paljon sähkötehoa tarvitaan yhden kuution siirtämiseen ilmaa. Kuvassa 5 näkyvään SFP-lukuun on lisätty sekä tulo- että poistoilmapuhaltimen SFP-luvut, joten tällä arvolla voidaan laskea molempien puhaltimien lisääntynyt sähköenergiankulutus kerralla. Kertomalla eri tiiviysluokkien vuotoilmamäärät SFP-luvulla sekä käyttöajalla laskentajak-

solla saadaan selville, kuinka paljon sähköenergiaa menee hukkaan vuotoilman mukana.

Hukkaan menevä sähköenergia luokassa L1 lasketaan kaavalla (D5, s.52, kaava 7.1):

$$W_{puhallin} = SFP * q_{vL1} * \Delta t \quad (6)$$

jossa	$W_{puhallin}$	hukkaan menevä sähköenergia [kWh]
	SFP	puhaltimien ominaissähköteho [kW/m ³ /s]
	q_{vL1}	vuotoilmamäärä luokassa L1 [m ³ /s]
	Δt	puhaltimen käyttöaika laskentajaksolla [h]

Puhaltimien lisääntynyttä sähköenergiankulutusta laskettaessa eri tiiviysluokien vuotoilmamäärät saadaan käyttämällä kaavaa 5. Tässä kohtaa voidaan laskea yhtä aikaa sekä tulo- että poistoilmapuolen vuotoilmavirrat, sillä SFP-luvussa ollaan huomioitu molempien puhaltimien ominaissähköteho. Puhaltimen käyttöaika laskentajaksolla tarkoittaa sitä aikaa, minkä puhallin on toiminnassa laskennassa huomioitavalla ajanjaksolla. Mikäli ilmavirtaa säädel-täisiin käyttöasteen mukaan, huomioitaisiin se tässä kohtaa. Tällöin huoneis-toihin puhalletaan maksimi-ilmavirta silloin, kun käyttö on suurta, ja hiljaisem-pana aikana IV-kone säädetään toimimaan osateholla.

Opinnäytetyössä tutkittavassa esimerkkitilanteessa ei säädetä ilmavirtaa käyt-töasteen mukaan, joten IV-kone ja täten puhallin toimii koko ajan maksimi-ilmavirralla. Laskuissa tarkasteluvälinä käytetään yhtä vuotta (365 päivää), joten tällöin kaavaan 7 kohtaan Δt (puhaltimen käyttöaika laskentajaksolla) sijoitetaan arvo $24 \text{ h/d} \times 365 \text{ d/a} = 8760 \text{ h/a}$.

Monissa kiinteistöissä pyritään säästämään energiaa pienentämällä ilmavirtoja käyttöasteen ollessa matala. Tällöin Δt tulisi muokata niin, että osan päivästä ja viikonloppuisin IV-kone kävisi täydellä teholla ja osan ajasta osateholla (esim. 40 %). Tämä vaikuttaisi siihen, että vuotoilmavirta olisi pienempi sinä aikana, kun IV-kone kävisi osateholla, jolloin myös hukkaan menevän sähkö-energian määrä olisi pienempi. Kaavoissa seitsemän ja kahdeksan on esitetty,

kuinka vuotoilman mukana hukkaan menevä sähköenergia voitaisiin laskea työpäivinä ja vapaapäivinä, mikäli ilmavirtaa säädeltäisiin käyttöasteen mukaan.

Hukkaan menevä sähköenergia työpäivän aikana, osatehon ollessa 40 %, lasketaan kaavalla:

$$W_{työpäivä} = SFP * q_{vL1} * h_{100\%} + SFP * q_{vL1} * 40 \% * h_{40\%} \quad (7)$$

jossa	$W_{työpäivä}$	hukkaan menevä sähköenergia [kWh]
	SFP	puhaltimien ominaissähköteho [kW/m ³ /s]
	q_{vL1}	vuotoilmamäärä luokassa L1 [m ³ /s]
	$h_{100\%}$	aika täydellä ilmavirralla [h]
	$h_{40\%}$	aika osateholla [h]

Vapaapäivänä hukkaan menevä sähköenergia, osatehon ollessa myös 40 %, lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$W_{vapaapäivä} = SFP * q_{vL1} * 40 \% * 24 h \quad (8)$$

4.4 Lämmitysenergiankulutus

Lämmityspattereiden hukkaan menevän lämmitysenergian selvittämisessä vaipan pinta-alaksi valitaan koko koneen sijasta lämmityspatterin jälkeisen kone-osan pinta-ala. Tämän takia laskennallinen vaippa pinta-ala on huomattavasti pienempi hukkaan menevässä lämmitysenergiassa kuin puhaltimien lisääntyneessä sähköenergiankulutuksessa.

Lämmityspatterin jälkeisen vaipan pinta-alan avulla voidaan laskea tältä osalta karkaava vuotoilmamäärä eri tiiviysluokissa käyttämällä kaavaa numero 5. Tämä vuotoilmavirta on siis lämmitettyä tuloilmaa, joten sen mukana menee hukkaan lämmitysenergiaa. Hukkaan menevän lämmitysenergian selvittäminen aloitetaan laskemalla vuotoilman lämmittämiseen vaadittava lämmityshontarve.

Hukkaan menevän vuotoilmavirran lämmitystehontarve tiiviysluokassa L1 lasketaan kaavalla (D5, s.63, kaava 9.10):

$$\phi_{\text{lämmitys}} = q_{vL1} * \rho_i * c_i * (T_{sp} - T_{LTO}) \quad (9)$$

jossa	$\phi_{\text{lämmitys}}$	vuotoilman lämmitystehontarve	[kW]
	q_{vL1}	vuotoilmamäärä luokassa L1	[m ³ /s]
	ρ_i	ilman tiheys	[kg/m ³]
	c_i	ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
	T_{sp}	sisäänpuhalluslämpötila	[°C]
	T_{LTO}	lämpötila LTO:n jälkeen	[°C]

Opinnäytetyössä lasketaan hukkaan menevää lämmitysenergiaa vuoden aikana, joten tämä tulee ottaa huomioon laskettaessa vuotoilman lämmitystehontarvetta. Ulkoilman lämpötilan ollessa korkea tuloilmaa ei tarvitse lämmitellä ollenkaan ja ulkoilman lämpötilan ollessa pakkasella tuloilmaa tulee lämmitellä enemmän. Tämän takia lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen vaihtelee merkittävästi riippuen kuukaudesta. Laskennallisesti tämä merkitsee sitä, että lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen määräytyy vuoden keskimääräisen lämpötilan ja LTO:n hyötysuhteen perusteella.

Lämpötila LTO:n jälkeen lasketaan kaavalla (D5, s 63, kaava 9.11):

$$T_{LTO} = T_u + \eta_t * (T_s - T_u) \quad (10)$$

jossa	T_{LTO}	LTO:n jälkeinen lämpötila	[°C]
	η_t	LTO:n vuosihyötysuhde	[-]
	T_s	sisäänpuhalluslämpötila	[°C]
	T_u	vuoden keskimääräinen ulkoilman lämpötila	[°C]

Vuoden keskimääräisenä ulkolämpötilana käytetään Suomen rakennusmääräyskokoelmassa määriteltyjä arvoja. Opinnäytetyön esimerkkikohde sijaitsee Etelä-Suomessa säävyöhykkeellä 1, joten lämpötilana käytetään +5,3 °C. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen, kuten myös poistoilman laskennallisen lämpötilan saa selville konetoimittajan koneajoista.

Vuotoilman lämmitystehontarpeen avulla voidaan laskea vuotoilman mukana hukkaan menevä lämmitysenergia. Lämmitysenergiaa karkaa samalla tavalla jatkuvasti IV-koneen käydessä täydellä teholla, kuin puhaltimien tapauksessa, joten Δt on sama 8760 h/vuosi. Todellisuudessa tuloilman lämmitystarvetta esiintyy ainoastaan silloin, kun ulkolämpötila laskee niin alas, että lämmöntalteenotto ei itsessään riitä lämmittämään. Laskuissa ulkolämpötilana on kuitenkin käytetty vuoden keskimääräistä ulkolämpötilaa, jolloin myös ajanjaksoksi tulee valita koko vuosi. Vuoden ajanjakso tasoittaa sen eron, mikä tulee talven kovien pakkasjaksojen ja kesän helteiden välille ja antaa tarpeeksi tarkan arvon laskujen suorittamiseen. Tällöin vuotoilman mukana hukkaan menevä lämmitysenergia lasketaan kaavalla:

$$Q_{\text{lämmitys}} = \phi_{\text{lämmitys}} * \Delta t \quad (11)$$

jossa	$Q_{\text{lämmitys}}$	hukkaan menevä lämmitysenergia	[kWh]
	$\phi_{\text{lämmitys}}$	vuotoilman lämmitystehontarve	[kW]
	Δt	käyttöaika laskentajaksolla	[h]

4.5 Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutus

Vuotoilman mukana hukkaan menevän jäähdytysjärjestelmän sähköenergian laskemisessa joudutaan hieman tekemään yksinkertaisia oletuksia, sillä kovin tarkkoja tietoja ulkoilman lämpötiloista tai sisäisistä lämpökuormista ei ole saatavilla. Jäähdytyshäviöiden tiedetään olevan esimerkkikohteessa pieniä, sillä tuloilmaa jäähdytetään vain kahdessa IV-koneessa. Myös vaiipan pinta-ala jää pieneksi, sillä jäähdytyspatteri sijaitsee viimeisenä tuloilman virtaussuunnasta katsottuna

Tuloilman jäähdytystä mietittäessä ensimmäinen selvitettävä asia on, missä ulkoilman lämpötilassa aletaan tuloilmaa jäähdyttää. Keittiön koneessa jäähdytysraja on ulkoilman noustessa yli +16 °C ja kirjaston koneessa yli +20 °C. Ulkoilma on vain tietyn osan kesäajasta yli kyseisten raja-arvojen, minkä takia jäähdytys ei toimi jatkuvasti. Tämän ajan, jonka ulkolämpötila on jäähdytysrajan yläpuolella, selvittämiseen käytettiin Ilmatieteen laitoksen ulkoilman lämpötilojen pysyvyyskäyrästä (liite 1). Käyrästä kertoo, kuinka monta prosenttia

ajasta lämpötila on jonkin tietyn lämpötilan alapuolella, eli sen avulla saadaan selville esimerkiksi, kuinka kauan lämpötila on välillä $+17\text{ °C}$ - $+18\text{ °C}$. Käyrästä on vuodelta 2012, joten se on hieman vanha, mutta antaa tarpeeksi luotettavaa tietoa, jotta sitä voidaan käyttää laskennassa.

Lämmöntalteenoton oletetaan olevan pois päältä jäähdytyslaskuja tehdessä. Ulkolämpötilan ollessa tarpeeksi korkea sisäilma voi olla ulkolämpötilaa matalampi, jolloin LTO:n avulla voitaisiin jäähdyttää tuloilmaa. Sisäisistä lämpökuormista ei ole kuitenkaan tietoa, joten poistoilman lämpötilasta ei voida sanoa tarkasti mitään. Laskut on laskettu siten, että jäähdytyspatterille tulee ulkoilman lämpöistä ilmaa ja sitä jäähdytetään kone-ajosta saatuihin arvoihin. Taulukossa 1 on esitetty, kuinka monta tuntia vuonna 2012 lämpötila on ollut yli 16 °C . Näitä lämpötiloja ja aikoja on käytetty hyväksi laskettaessa jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutusta

Taulukko 1. Lämpötilat tunneittain

	Tunteina
Lämpötila 17 °C	309
Lämpötila 18 °C	209
Lämpötila 19 °C	180
Lämpötila 20 °C	160
Lämpötila 21 °C	142
Lämpötila 22 °C	98
Lämpötila 23 °C	49
Lämpötila 24 °C	41
Lämpötila 25 °C	29
Lämpötila 26 °C	33
Lämpötila 27 °C	6
Lämpötila 28 °C	3
Lämpötila 29 °C	5

IV-koneen vaipan vuotoilman takia lisääntynyt jäähdytysenergiankulutus lasketaan varsin samankaltaisesti kuin lisääntynyt lämmitysenergiankulutus. Ensiksi lasketaan jäähdytyspatterin jälkeisen osan vaipan pinta-ala, joka sijoittamalla kaavaan 5 saadaan vuotoilmavirta vaipan läpi. Tämän jälkeen voidaan laskea vuotoilman mukana hukkaan menevä tuotettu jäähdytysenergia yhdistelemällä kaavoja 9 ja 11.

Esimerkiksi tiiviysluokassa L1, vuotoilman mukana hukkaan menevä tuotettu jäähdytysenergia lasketaan kaavalla:

$$Q_{\text{jäähdytys}} = q_{vL1} * \rho_i * c_i * (T_u - T_{sp}) * \Delta t \quad (12)$$

jossa	$Q_{\text{jäähdytys}}$	vuotoilman tuotettu jäähdytysenergia	[kWh]
	q_{vL1}	vuotoilmamäärä luokassa L1	[m ³ /s]
	ρ_i	ilman tiheys	[kg/m ³]
	c_i	ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
	T_u	ulkolämpötila	[°C]
	T_{sp}	sisäänpuhalluslämpötila	[°C]
	Δt	käyttöaika laskentajaksolla	[h]

Vuotoilman mukana hukkaan menevä tuotettu jäähdytysenergia tulee laskea erikseen jokaiselle ulkolämpötilalle, joka ylittää IV-koneen jäähdytysrajan. Lämpötilaero nousee, kun ulkolämpötila nousee, jonka takia keittiön IV-koneessa lasketaan tuotettu jäähdytysenergia kaikissa taulukon 1 lämpötiloissa ja lopuksi tulokset lisätään yhteen. Kirjaston IV-koneessa jäähdytysrajana oli +20 °C, joten tällöin lasketaan taulukon 1 lämpötiloista +21 °C eteenpäin. Käyttöaika kaavaan 13 saadaan myös taulukosta 1, missä kerrotaan tuntien määrä, jonka lämpötila on tuossa tietyssä arvossa vuoden aikana.

Vuotoilman mukana hukkaan menevä tuotettu jäähdytysenergia ei vielä itsessään riitä, vaan on otettava huomioon jäähdytysenergian tuottoprosessin vuotuinen kylmäkerroin, jonka jälkeen saadaan selville vuotuinen jäähdytysjärjestelmän sähköenergian kulutus. Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D5 on määritelty eri tuottoprosessien vuotuisia kylmäkertoimia (taulukko 8.1, s. 57). Esimerkkikohteen IV-koneissa on suora höyrystyspatterit (vastaa Split laitteita), joten kylmäkerroin on tällöin 3.

Vuotoilman mukana hukkaan mennyt jäähdytysjärjestelmän sähköenergia lasketaan siis kaavalla:

$$W_{\text{jäähdytys}} = \frac{Q_{\text{jäähdytys}}}{\varepsilon_E} \quad (13)$$

jossa	$W_{\text{jäähdytys}}$	hukkaan menevä jäähdytysjärjestelmän sähköenergia	[kWh]
	$Q_{\text{jäähdytys}}$	vuotoilman tuotettu jäähdytysenergia	[kWh]
	ε_E	kylmäkerroin	[-]

5 ESIMERKKIKOHDE

Opinnäytetyön laskennassa käytettävä esimerkkikohde on Etelä-Suomessa (säävyöhyke 1) sijaitseva koulurakennus. Koska koulurakennus on kaupungin omistama kiinteistö, eikä tämän opinnäytetyön tilaajana toimi kyseinen kaupunki, jätetään esimerkkikohde sen tarkemmin nimeämättä tai kuvaamatta. Kaupunki on antanut luvan käyttää oikeita koneajoja, joten ilmavirrat, vaipan pinta-alat, paineet yms. ovat täysin totuudenmukaisia. Lisäksi kaikki muut tiedot, kuten IV-koneiden käyntiajat ja lämpötilatiedot on ollut saatavilla, joten laskentatuloksia voidaan pitää luotettavina.

Kohteessa on kymmenen tilaajan toimittamaa AL-KO:n IV-konetta. Kahdesta näistä koneesta on tuloilman jäähdytystä ja lämmitystä, muissa kahdeksassa on vain lämmitystä. Kiinteistön IV-koneiden LTO-laitteista kuusi on pyöriviä lämmönsiirtimiä ja neljä vesi-glykoli lämmönsiirtimiä. Esimerkkikohteessa ei säädellä ilmavirtaa käyttöasteen mukaan, joten IV-kone pyörii jatkuvasti vakio-ilmavirralla.

Laskut on laskettu kappaleessa neljä esitellyillä kaavoilla. Lämmitysenergiolaskuissa ulkolämpötilana on käytetty vyöhykkeen 1 ulkoilman keskilämpötilaa, eli +5,3 °C ja poistoilman lämpötilana +22 °C. Lämmityspatterin jälkeisenä ilman lämpötilana on yhtä IV-konetta lukuun ottamatta käytetty +20 °C (kone 2 +18,8 °C). Sähköenergian hintana laskuissa on käytetty 10 snt/kWh, eli 0,1 €/kWh ja kaukolämmön hintana 60 €/MWh, eli 0,06 €/kWh. Energian hinta vaihtelee todella paljon sijainnista riippuen. Lisäksi tulevaisuudessa hinnat tulevat todennäköisesti kasvamaan. Tämän takia oleellisempi arvo on hukkaan menevä energiamäärä yksikössä kWh/a, mutta tulokset on esitetty myös yksikössä €/a, sillä se on usein helpompi sisäistää.

Taulukossa 2 on esitetty IV-kone ykkösen vuotoilman mukana lisääntynyt energiankulutus. Muiden IV-koneiden tulokset on esitetty liitteissä 2-10, sillä ne vievät sen verran tilaa, ettei niiden esittely tässä ole järkevää. IV-kone 1 on toinen esimerkkikohteen IV-koneista, joka on varusteltu jäähdytyspatterilla. Siinä tuloilmaa aletaan jäähdyttää ulkoilman lämpötilan noustessa yli +20 °C ja se jäähdytetään lämpötilaan +18 °C. Ilmanvaihtokone 6 on toinen, jossa jäähdytetään tuloilmaa. Siinä jäähdytys aloitetaan, kun ulkoilman lämpötila nousee yli +16 °C ja ilma jäähdytetään lämpötilaan +16 °C.

Taulukko 2. Ilmanvaihtokoneen 1 vuotoilmassa hukkaan menevä energia (pyörivä LTO)

ILMANVAIHTOKONE 1				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	0,8	0,8	Pituus patterin jälkeen	1,6 m
Sisäinen paine (Pa)	552	369	Pinta-ala patterin jälkeen	4,9 m ²
Pituus (m)	4,2	3,1	LTO:n hyötysuhde	71 %
Korkeus (m)	0,5	0,5	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,2 °C
Leveys (m)	1,0	1,0	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,9 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	12,4	8,9	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,7 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,3	1,2	Vuotoilmamäärä luokassa L3	8,0 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	6,8	3,7	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	26,6 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	20,3	11,2	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	79,8 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	239,4 kWh/a
SFP-luku	1,524 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	1,6 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	46,8 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	4,8 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	140,4 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	14,4 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	421,1 kWh/a		Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutus	
Rahallinen hukka luokassa L1	4,7 €/a		Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Rahallinen hukka luokassa L2	14,0 €/a		Pinta-ala patterin jälkeen	3,4 m ²
Rahallinen hukka luokassa L3	42,1 €/a		Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,6 dm ³ /s
			Vuotoilmamäärä luokassa L2	1,8 dm ³ /s
			Vuotoilmamäärä luokassa L3	5,5 dm ³ /s
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L1	0,5 kWh/a
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L2	1,2 kWh/a
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L3	3,7 kWh/a
			Rahallinen hukka luokassa L1	0,05 €/a
			Rahallinen hukka luokassa L2	0,12 €/a
			Rahallinen hukka luokassa L3	0,37 €/a

Alla olevissa taulukoissa on vielä esitetty yhteenvetona kaikkien IV-koneiden vuotoilman mukana hukkaan menevä energiamäärä niin kilowattitunteina kuin

euroina. Taulukossa 3 on kasattu jokaisen esimerkkikohteen IV-koneen tulokset niin, että pystytään lukemaan tiiviysluokittain hukkaan menevä energiamäärä eri energiamuodoissa. Tästä taulukosta pystytään lukemaan, mistä tulee suurimmat häviöt vuotoilman kannalta tarkasteltuna. Taulukossa 4 on esitetty tiivistettynä kokonaisenergiähäviöt sekä rahalliset häviöt eri tiiviysluokissa, jolloin pystytään tekemään vertailua eri tiiviysluokkien välillä. Johtopäätökset-kappaleessa on analysoitu tuloksia ja niiden merkitystä tarkemmin.

Taulukko 3. Kaikkien IV-koneiden yhteenlasketut häviöt eri energiamuodoissa tiiviysluokittain

	kWh/a	€/a
Sähköenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L1	547,1	54,7
Sähköenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L2	1641,3	164,1
Sähköenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L3	4924,0	492,4
Lämmitysenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L1	297,8	17,9
Lämmitysenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L2	893,5	53,6
Lämmitysenergiaa hukkaan tiiviysluokassa L3	2680,4	160,8
Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiaa hukkaan L1	1,8	0,3
Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiaa hukkaan L2	5,4	0,5
Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiaa hukkaan L3	15,9	2,7

Taulukko 1. Vuotoilman mukana hukkaan menevä kokonaisenergia

Energiahukka tiiviysluokassa L1	846,8 kWh/a
Energiahukka tiiviysluokassa L2	2540,2 kWh/a
Energiahukka tiiviysluokassa L3	7620,3 kWh/a
Rahallinen hukka tiiviysluokassa L1	72,8 €/a
Rahallinen hukka tiiviysluokassa L2	218,2 €/a
Rahallinen hukka tiiviysluokassa L3	655,9 €/a

6 VUOTOILMAN AIHEUTTAMAT MUUT HAITAT

Tässä opinnäytetyössä on perehdytty vuotoilman mukana hukkaan meneviin energiahäviöihin, mutta on hyvä muistaa, että IV-koneen vaipan läpi hallitsemattomasti vuotava ilma aiheuttaa myös muita haittavaikutuksia. Ilmanvaihtokoneessa jokaisella osalla on tietty tarkoitus, ja mikäli ilma pääsee vuotamaan huonetilaan kulkematta näiden osien läpi, aiheuttaa se väistämättä sisäilman laadun heikkenemistä. Useimmiten ilmanvaihtokoneet sijaitsevat kuitenkin IV-konehuoneessa, jossa sisäilman laadulla ei ole niin suurta merkitystä, joten haittavaikutukset eivät ole niin merkittäviä.

6.1 Muiden kanavaosien tiiviys

Tämän opinnäytetyön tuloksia tarkasteltaessa yksi tärkeimmistä asioista, johon tulee kiinnittää huomiota, on muiden kanavaosien tiiviys. Vaikka IV-kone olisi parasta tiiviysluokkaa ja sillä saataisiin hyvät säästöt energiankulutuksessa, voidaan kaikki tämä etu hukata sillä, että ilma vuotaa hukkaan muissa kanavaosissa.

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D2 sanotaan kanavien tiiviydestä seuraavasti: ” Ilmanvaihtojärjestelmän kanavisto on yleensä riittävän tiivis, kun se on tiiviydeltään vähintään tiiviysluokkaa B. Tavanomaisissa ilmanvaihtojärjestelmissä saavutetaan kanaviston tiiviysluokka B yleensä, kun käytettävien ilmakehien ja kanavanosien tiiviysluokka on C.” Eri tiiviysluokat oli esitelty kappaleessa 2 kuvissa 2 ja 3. [2, s.16.]

Kanavaosien tiiviyskokeista sanotaan seuraavasti: ” Jos kanavisto on tehty vähintään tiiviysluokan C mukaisista laadultaan testatuista ja tarkastetuista kanavista ja kanavanosista, voidaan tiiviys mitata pistokokein. Pistokokeiden laajuus on 20 % kanaviston pinta-alasta. Jos kanavien ja kanavaosien tiiviysluokka on parempi kuin C, on pistokokeiden laajuus 10 % kanaviston pinta-alasta. Jos kanavistossa on tiiviysluokkaa C huonompia kanavia ja kanavanosia, kasvatetaan pistokokeiden laajuutta näiden pinta-alalla. Jos näiden kanavien ja kanavanosien pinta-ala on yli 25 % kanaviston kokonaispinta-alasta, mitataan koko kanavisto.” [2, s. 22.]

Suurin osa kanavistosta on pyöreää kanavaa, joka on vähintään tiiviysluokkaa C. Osa tuotevalmistajista tarjoaa myös tiiviysluokan D kanavaa, joka on vielä astetta tiiviimpää. Näissä kanavaosissa tiiviysvaatimukset täyttyvät helposti, sillä ne ovat valmistettu ja tarkistettu suurissa tuotantolaitoksissa, jolloin virheen mahdollisuus pienenee huomattavasti. Jotkut kanavaosat, kuten suora-kaidekanavat ja jakolaatikot eivät ole tehdasvalmisteisia, vaan peltiseppä tekee ne erikseen tilauksesta. Nämä kanavaosat ovat sellaisia, joihin ei ole valmiiksi tehty tiiviyskoetta, joten vuodon riski on suurempi kuin normaalissa pyöreässä kanavassa. Näissä osissa on suurin riski hukata kaikki se hyöty, joka tiiviillä ilmanvaihtokoneella on saatu, joten tiiviyskokeita ei tehdasvalmistetuille osille voida pitää varsin tärkeinä.

Työterveyslaitokselle tehdyssä tutkimuksessa ”Ilmanvaihtokanavien tiiviys pientaloissa” on käyty läpi kanavien tiiviysvaatimuksia ja suoritettu mittauksia useammassa esimerkkikohteessa, jotta voidaan vertailla oikeita tuloksia viiranomaismääräyksiin. Mittaukset suoritettiin kahdessa matalaenergiatalossa ja kahdessa tavanomaisessa pientalossa. Mittaustuloksista selviää, että vuotoilmavirta on jokaisessa kohteessa pienempi kuin tiiviysluokan A raja-arvo, mutta suurempi kuin tiiviysluokan B raja-arvo. Suomen rakennusmääräyskoelmassa oli esitetty ilmanvaihtojärjestelmän kanavistolle vaatimukseksi, että sen tulisi täyttää vähintään tiiviysluokan B vaatimukset, mikä ei näissä kiinteistöissä täyty. Esimerkkikohteissa mitatut vuotoilmavirrat olivat noin 5–10 % puhaltimien arvioiduista ilmavirroista. Tutkimuksen tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että myös kanavien tiivyyteen tulisi kiinnittää huomiota, ettei tiiviillä koneella saatu hyöty mene myöhemmin hukkaan. [10.]

6.2 Melu

Yksi vuotoilman mukana siirtyvä ja syntyvä elementti on ääni. Yksi tärkeimmistä asioista ilmanvaihtoa suunnitellessa on varmistaa, ettei äänitaso nouse liian korkeaksi huoneistoissa. Tämän takia ilmanvaihtojärjestelmä on useimmiten varustettu äänenvaimentimilla, joiden tehtävänä on laskea kanaviston desibelimäärää. Vuotoilman mukana siirtyy siis vaimentamatonta ääntä huoneistoihin, niin IV-koneen osalta kuin myös kanaviston osalta.

Ilmanvaihtokoneessa äänenvaimennin sijaitsee useimmiten kammiopuhaltimen jälkeen. Se on äänenvaimentimelle ihanteellinen sijainti, sillä äänitaso on tässä kohdassa korkeimmillaan. Kammiopuhaltimen etuna radiaalipuhaltimeen on se, että äänenvaimennin voidaan sijoittaa heti puhaltimen jälkeen. Tällöin myös vaippa pinta-ala, jonka osalla äänitaso on korkea jää pienemmäksi ja vuotoilman mukana ei kulkeudu niin paljon melua ympäristöön. [4, s. 176.]

Kuten muissa tämän kappaleen asioissa, vuotoilman mukana lisääntynyt melu ympäristöön ei koske ainoastaan ilmanvaihtokonetta ja sen ympäristöä. Ilmaa vuotaa kaikissa kanaviston osissa, jolloin myös ääntä vuotaa vaimentamattomana ympäristöön kaikkialla. Äänitaso on korkeimmillaan heti puhaltimen jäl-

keen, jolloin IV-koneen äänenvaimentimella on suuri vaimentava vaikutus. Kuitenkin äänitaso on varsin korkea muissakin osissa kanavaa. On silti vaikeaa määrittää, kuinka suuri tuo vuotoilman mukana kulkeutuva desibelimäärä on. Kanaviston osalta puhutaan todennäköisesti niin pienistä desibelimääristä, että sitä ei ihmiskorvalle huomaa. IV-konehuoneessa vuotoilman mukana kulkeutuva äänitaso voi olla hieman korkeampi, mutta koska kyseessä on konehuone, ei hättäväikutus ole kovin suuri.

6.3 Epäpuhtaudet

Kolmas tekijä, joka tulee ottaa huomioon tarkisteltaessa muita vuotoilman mukana lisääntyviä haittoja, on ilman epäpuhtaudet. Jokainen ilmanvaihtokone on varusteltu suodattimilla, sillä ympäristössämme oleva ilma sisältää paljon epäpuhtauksia. Suodattimien tehtävä onkin puhdistaa tuloilma riittävän puhtaaksi palveltavien tilojen tarpeen mukaan. [4, s.167.]

Sisäilmastoluokkien 1 ja 2 sekä standardin SFS-EN 13779 mukaan suodatuksen tulee olla kaksipuolainen, jolloin toisen osan tulisi olla ilmankäsittelyosien jälkeen. Ensimmäinen suodatusosa sijaitsee useimmissa IV-koneissa raitisilmapuolella heti sulkupellin jälkeen, jolloin suurin osa epäpuhtauksista saadaan suodatettua heti alussa. Nykyisin toinen suodatusporras sijoitetaan tavallisesti heti esisuodattimen jälkeen, mutta esimerkiksi sairaaloissa ja puhdistiloissa aina koneosien jälkeen. Ilmankäsittelykoneissa käytetään pääsääntöisesti karkeasuodattimia (suodatusluokat G1-G4), perussuodattimia (M5-M6) ja hienosuodattimia (F7-F9). Karkea- ja perussuodattimia käytetään lähinnä esisuodattimina ja hienosuodattimia pääsuodattimina. [4, s.167.]

Vuotoilman mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet riippuvat hyvin paljon IV-koneen rakenteesta. Kuvassa 6 on esitetty yksi esimerkkikohteen IV-koneista. Ensimmäinen suodatin sijaitsee raitisilmapuolella heti sulkupellin jälkeen. Ilmanvaihtokoneessa on pyörivä lämmöntalteenotto, jolloin poistoilmapuolelta voisi kulkeutua epäpuhtauksia tuloilmaan, mistä se voisi vuotaa huonetiloihin. Koneajosta huomataan, että poistoilmapuoli on varusteltu suodattimella (suodatusluokka F7), joten poistoilma on puhdistettu jo ennen lämmöntalteenottoa. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkkikohteessa ei vuotoilman mukana pitäisi kulkeutua epäpuhtauksia huonetiloihin.

Joissakin ilmanvaihtokoneissa vuotoilman mukana kulkeutuvat epäpuhtaudet on suurempi haittatekijä, vaikka esimerkkikohteessa näin ei ole. Kappaleessa kaksi viitatussa Price Industriesin tutkielmassa vuotoilman mukana karkaavaa suodattamatonta tuloilmaa pidetään varsin suurena riskitekijänä, varsinkin sairaaloissa ja muissa puhdastiloissa. Tämän takia suodattimien sijoittelulla ja suodatusasteella on varsin suuri merkitys. Loogisesti ajateltuna, mitä pienemmäksi se pinta-ala, jossa ilma on suodattamatonta, sitä pienempi on vuotoilman mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien määrä. Normaaaleissa kiinteistökohteissa tämä ei ole varmasti kovin oleellinen haitta, mutta korkean puhtaus-tason vaativissa kohteissa voi epäpuhtaudet aiheuttaa haittaa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmanvaihtokoneen tiiviys ja vuotoilma vaipan läpi on asia, johon ei ole juuri-kaan perehdytty. Tämän huomaa jo siitä, että tausta-aineiston ja lähteiden löytäminen tämän opinnäytetyön tekoon osoittautui hyvin vaikeaksi tehtäväksi. Rakennusmääräyskokoelmissa ilmanvaihtokoneen tiiviys oli käsitelty muutamalla lauseella. Ilmanvaihtokoneen energiansäästöä pohdittaessa lämmöntalteenotto on yleisin ja tehokkain tapa. Lämmöntalteenoton avulla saadaan parhaat säästöt, ja se onkin nykyään vakiokalustoa oikeastaan kaikissa IV-koneissa. Yksi energiansäästötapa ei kuitenkaan sulje toista pois, joten vaipan tiiviyn vaikutusta ei tule väheksyä.

Opinnäytetyössä on laskettu yhden esimerkkikohteen ja kymmenen eri ilmanvaihtokoneen vuotoilman mukana lisääntyneitä energiankulutuksia. Mikäli haluttaisiin mahdollisimman monipuolinen ja kattava tulos, tulisi esimerkkikohteita olla useampia ja koneiden kokoerojen olla suurempia. Tässä esimerkkikohteessa ei ole yhtään todella isoa IV-konetta, jossa ilmavirrat ja paineet ovat kovia, jolloin myös vuotoilmavirta on suurempi. Opinnäytetyön esimerkkikohteen vahvuus on se, että ilmanvaihtokoneita on niin monta ja erilaisella lämmöntalteenotolla varusteltuja, että mielestäni tuloksista voidaan vetää jonkinlaisia johtopäätöksiä.

Kaikista tiiviimmällä L1-luokalla hukkaan menevä energiamäärä on todella pientä. Esimerkkikohteessa vuoden aikana hukkaan meni yhteensä 846,8

kWh, mikä ei tee rahallisesti kovin suurta menetystä. L3-tiiviysluokassa vuotoilman mukana menee hukkaan 89 % prosenttia enemmän energiaa. Tuo erotus tulee vuotoilmakertoimista, joten se pysyy samana, tutkitaan kokonaisenergiankulutusta, sähköenergiankulutusta, lämmitysenergiankulutusta tai mitä tahansa. L2-luokassa menee hukkaan 33 % prosenttia enemmän energiaa, kuin L1-luokassa. Erot ovat varsin suuria, varsinkin jos aikaväliksi otetaan koko elinkaari eli sen 15-20 vuotta.

Kaikki työssä esitetyt laskut ja tulokset ovat hyvin teoreettisia, sillä ei ole ollut mahdollisuutta tehdä oikeita tiiviyskokeita. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää mielestäni varsin todellisina ja suuntaa antavina. Tiiviillä vaipalla saadut hyödyt energiansäästöllä tarkasteltuna riippuu monesta eri asiasta. Ilmamäärien säätely käyttöasteen mukaan on suurin tuloksiin vaikuttava tekijä. Mikäli esimerkkikohteessa olisi käytetty maksimi-ilmavirtaa kahdeksan tuntia päivässä ja loppuaika sekä viikonloput olisi puhallettu osateholla 40 %, olisi vuotoilman mukana hukkaan mennyt energia vähentynyt lähes puolella. Lämmöntalteenoton hyötysuhde vaikuttaa oleellisesti tuloilman lämmitystarpeeseen. Hyvä muistisääntö on, että mitä käsitellympää ilma on, sitä suurempaa on myös energiankulutus. Tällöin myös vaipan tiiviys korostuu.

Tulevaisuudessa energiansäästövaatimukset tulevat todennäköisesti tiukentumaan. Ainakin lämmöntalteenoton hyötysuhteiden vaatimustasoja tullaan nostamaan. Tämän myötä pattereilta ei todennäköisesti vaadita yhtä paljon lämmitystehoa, mikä vähentää lämmitysenergiankulutusta. Myös puhaltimien suurin sallittu SFP-luku tullaan pienentämään 1,8 kW/(m³/s). Nämä ovat sellaisia asioita, jotka voivat tulevaisuudessa mahdollisesti pienentää vuotoilman mukana hukkaan menevän energian määrää. Kuitenkin ainakin tämän opinäytetyön esimerkkikohteen jokaisen puhaltimen SFP-luku on jo nyt pienempi kuin 1,8 kW/(m³/s). Tämän takia on vaikeaa sanoa, kuinka suureksi säästöt tulevat näiden lakimuutosten myötä muotoutumaan, kun laitevalmistajat tekevät jo ennestään energiatehokkaita tuotteita.

Mikäli kehitys jatkuu entisellään, tulevat energian hinnat nousemaan entisestään. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki energiansäästötavat ovat tervetulleita. Ilmanvaihtokoneen vaipan tiiviys ei välttämättä ole kaikista tehokkain tapa, mutta erot tiiviysluokkien välillä ovat varsin suuret. Näillä energiahinnoilla L1-

luokalla saavutettaisiin 15 vuoden aikavälillä noin 8750 € säästöt L3-luokkaan ja 2200 € säästöt L2-luokkaan verrattuna. Mielestäni puhutaan jo varsin suurista rahallisista summista näin helpolla energiansäästötavalla. Varsinkin, kun otetaan huomioon, että energiahinnat tulevat tulevaisuudessa kasvamaan.

En tiedä, kuinka moni laitevalmistaja tarjoaa ilmanvaihtokoneita L3- ja L2-luokan tiiviydellä. Tilausvaiheessa kannattaa kuitenkin kiinnittää huomiota myös muihin asioihin kuin hintaan tai lämmöntalteenoton hyötysuhteeseen, sillä säästöjä voi tulla myös yllättävämmissä paikoista kun ilmanvaihtokoneen elinkaaren aikana nuo säästöt voivat nousta hyvin merkittäviin mittasuhteisiin.

LÄHTEET

- [1] Seppänen, O. Ilmastoinnin suunnittelu. Suomen LVI-liitto. 2004
- [2] Suomen rakennusmääräyskokoelma D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö 2012
- [3] Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ilmankäsittelykoneet. Tyyppihyväksyntäohjeet 2008. Ympäristöministeriö 2008
- [4] Sandberg, E. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Talotekniikka-Julkaisut Oy. 2014
- [5] European standard EN 1886:2007. Ventilation for buildings - Air handling units – Mechanical performance
- [6] Crowther, H. 2014. Air leakage in air handling units. Tutkielma. Saatavissa:
<https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/technical-papers/air-leakage-in-air-handling-units.pdf> [viitattu 1.4.2017]
- [7] Manner, J. 2013. SFP-luku LVI-suunnittelussa. Opinnäytetyö. Saatavissa:
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/66466/SFP-luku%20LVI-suunnittelussa.pdf?sequence=1> [viitattu 11.3.2017]
- [8] Fläkt Woods. Tekninen käsikirja
- [9] IV Produkt, Tekniikka & järjestelmät
- [10] Salmi, K., Kähkönen, E., Holopainen, R., Pasanen, P. & Reijula, K. Ilmanvaihtokanavien tiiviys pientaloissa. Tutkielma. Työterveyslaitos & Itä-Suomen yliopisto. Saatavissa:
<http://www.sisailmayhdistys.fi/wp-content/uploads/2013/09/Kari-Salmi.pdf> [viitattu 1.4.2017]

Ulkoilman lämpötilojen esiintymistiheys nykyilmastossa (TRY2012) pysyvyyssarvoina vyöhykkeillä I-II (Vantaa)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	vuosi	talvi	kesä	
	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760	6552	2208	
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21
-20	0.0027	0.0074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0011	0	-20
-19	0.0067	0.0238	0.0067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0.004	0	-19
-18	0.0202	0.0417	0.0081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0.0075	0	-18
-17	0.0309	0.0536	0.0094	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0	0.008	0.0107	0	-17
-16	0.0444	0.0729	0.0148	0	0	0	0	0	0	0	0.0097	0	0.0114	0.0153	0	-16
-15	0.0766	0.1086	0.0202	0	0	0	0	0	0	0	0.0139	0	0.0177	0.0237	0	-15
-14	0.0927	0.1682	0.0323	0	0	0	0	0	0	0	0.0361	0.0081	0.0272	0.0363	0	-14
-13	0.1089	0.2024	0.0376	0	0	0	0	0	0	0	0.0528	0.0242	0.0344	0.0459	0	-13
-12	0.1358	0.2292	0.0511	0	0	0	0	0	0	0	0.0722	0.0376	0.0426	0.0569	0	-12
-11	0.1492	0.2426	0.0591	0	0	0	0	0	0	0	0.0931	0.0538	0.0485	0.0649	0	-11
-10	0.1613	0.2649	0.0712	0	0	0	0	0	0	0	0.1042	0.0645	0.0541	0.0723	0	-10
-9	0.1868	0.2768	0.0806	0	0	0	0	0	0	0	0.1097	0.0793	0.0597	0.0798	0	-9
-8	0.2151	0.2932	0.1089	0	0	0	0	0	0	0	0.1264	0.0941	0.0684	0.0914	0	-8
-7	0.2567	0.3244	0.1599	0	0	0	0	0	0	0	0.1431	0.125	0.0826	0.1105	0	-7
-6	0.2796	0.369	0.2191	0	0	0	0	0	0	0	0.1681	0.1747	0.0993	0.1328	0	-6
-5	0.3199	0.4048	0.2728	0	0	0	0	0	0	0	0.1875	0.2567	0.1186	0.1586	0	-5
-4	0.3737	0.4405	0.3118	0	0	0	0	0	0	0	0.2111	0.3427	0.1385	0.1851	0	-4
-3	0.4261	0.4792	0.3723	0.0083	0	0	0	0	0	0	0.2319	0.4261	0.1605	0.2146	0	-3
-2	0.4718	0.5313	0.4422	0.0347	0	0	0	0	0	0.0013	0.2708	0.4866	0.1849	0.2473	0	-2
-1	0.5874	0.558	0.5	0.0694	0	0	0	0	0	0.0108	0.3028	0.5323	0.2119	0.2833	0	-1
0	0.6492	0.6265	0.6089	0.1097	0	0	0	0	0	0.0228	0.3528	0.6062	0.2463	0.3294	0	0
1	0.8266	0.7128	0.8011	0.1778	0.0081	0	0	0	0.0028	0.0484	0.4278	0.6801	0.3055	0.4084	0	1
2	0.9664	0.7798	0.914	0.3153	0.0188	0	0	0	0.0083	0.1022	0.4903	0.7675	0.3619	0.4838	0	2
3	1	0.8795	0.9637	0.4472	0.0309	0	0	0	0.0222	0.1976	0.5486	0.9073	0.4144	0.554	0	3
4	1	0.939	0.9812	0.5708	0.0457	0.0028	0	0	0.0514	0.3091	0.6167	0.9691	0.4548	0.6078	0.0009	4
5	1	0.9583	0.9879	0.6597	0.0685	0.0097	0	0	0.0903	0.3898	0.7069	1	0.4868	0.6497	0.0032	5
6	1	0.9866	0.9973	0.7278	0.1129	0.0167	0	0	0.1236	0.504	0.8181	1	0.5212	0.6951	0.0054	6
7	1	0.9926	1	0.7681	0.1895	0.0292	0	0.004	0.1833	0.6062	0.8944	1	0.553	0.7357	0.0109	7
8	1	0.9985	1	0.8111	0.2876	0.05	0.0027	0.017	0.2694	0.6882	0.9528	1	0.5872	0.7773	0.0231	8
9	1	1	1	0.8375	0.371	0.0861	0.0067	0.039	0.3597	0.7608	1	1	0.6192	0.8132	0.0435	9
10	1	1	1	0.8583	0.4785	0.1403	0.0215	0.067	0.4472	0.836	1	1	0.6517	0.8458	0.0756	10
11	1	1	1	0.8833	0.5632	0.2028	0.0336	0.121	0.5583	0.8831	1	1	0.6848	0.8758	0.1182	11
12	1	1	1	0.9111	0.6532	0.2764	0.0739	0.183	0.6361	0.9113	1	1	0.7183	0.9008	0.1766	12
13	1	1	1	0.9292	0.7191	0.3889	0.1156	0.23	0.7014	0.961	1	1	0.7517	0.9231	0.2432	13
14	1	1	1	0.9431	0.7782	0.4833	0.1828	0.31	0.7861	1	1	1	0.7885	0.9451	0.3238	14
15	1	1	1	0.9556	0.828	0.5819	0.2473	0.425	0.8514	1	1	1	0.8224	0.9592	0.4162	15
16	1	1	1	0.9625	0.8602	0.6681	0.3522	0.531	0.9111	1	1	1	0.8556	0.9702	0.5154	16
17	1	1	1	0.9778	0.9046	0.7528	0.4987	0.616	0.9556	1	1	1	0.8909	0.9818	0.6209	17
18	1	1	1	0.9889	0.9274	0.8097	0.6008	0.688	0.975	1	1	1	0.9148	0.9878	0.6984	18
19	1	1	1	1	0.9422	0.8611	0.6761	0.763	0.9917	1	1	1	0.9354	0.9925	0.7659	19
20	1	1	1	1	0.9583	0.9194	0.7608	0.813	1	1	1	1	0.9537	0.9953	0.8302	20
21	1	1	1	1	0.9704	0.9625	0.8441	0.867	1	1	1	1	0.9699	0.9966	0.8904	21
22	1	1	1	1	0.9879	0.9806	0.9059	0.902	1	1	1	1	0.9811	0.9986	0.9289	22
23	1	1	1	1	0.9933	0.9917	0.9328	0.925	1	1	1	1	0.9866	0.9992	0.9493	23
24	1	1	1	1	1	1	0.953	0.945	1	1	1	1	0.9913	1	0.9656	24
25	1	1	1	1	1	1	0.9772	0.96	1	1	1	1	0.9946	1	0.9787	25
26	1	1	1	1	1	1	0.9973	0.984	1	1	1	1	0.9984	1	0.9937	26
27	1	1	1	1	1	1	1	0.989	1	1	1	1	0.9991	1	0.9964	27
28	1	1	1	1	1	1	1	0.993	1	1	1	1	0.9994	1	0.9977	28
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	29

ILMANVAIHTOKONE 2				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	3,4	4	Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Sisäinen paine (Pa)	346	389	Pinta-ala patterin jälkeen	6,4 m ²
Pituus (m)	4,1	3,2	LTO:n hyötysuhde	54,8 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	14,5 °C
Leveys (m)	1,9	1,9	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,9 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	23,6	18,7	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,6 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	3,2	2,7	Vuotoilmamäärä luokassa L3	7,7 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	9,5	8,1	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	39,2 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	28,5	24,3	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	117,7 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	353,0 kWh/a
SFP-luku	1,796 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	2,4 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	92,3 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	7,1 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	277,0 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	21,2 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	830,9 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	9,2 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	27,7 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	83,1 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 3				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	3,5	3,2	Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Sisäinen paine (Pa)	367	284	Pinta-ala patterin jälkeen	6,4 m ²
Pituus (m)	4,0	3,5	LTO:n hyötysuhde	72 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,3 °C
Leveys (m)	1,9	1,9	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,9 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	22,1	19,4	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,7 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	3,1	2,3	Vuotoilmamäärä luokassa L3	8,0 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	9,2	6,9	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	25,1 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	27,7	20,6	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	75,2 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	225,7 kWh/a
SFP-luku	1,017 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	1,5 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	47,9 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	4,5 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	143,7 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	13,5 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	431,2 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	4,8 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	14,4 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	43,1 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 4				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	4,3	3,7	Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Sisäinen paine (Pa)	269	227	Pinta-ala patterin jälkeen	7,1 m ²
Pituus (m)	4,1	3,5	LTO:n hyötysuhde	71,2 %
Korkeus (m)	1,3	1,3	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,2 °C
Leveys (m)	1,9	1,9	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,8 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	24,9	21,5	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,4 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,8	2,2	Vuotoilmamäärä luokassa L3	7,2 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	8,5	6,6	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	23,8 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	25,5	19,7	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	71,3 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	214,0 kWh/a
SFP-luku	0,878 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	1,4 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	38,6 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	4,3 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	115,9 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	12,8 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	347,8 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	3,9 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	11,6 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	34,8 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 5				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	0,6	1	Pituus patterin jälkeen	1,2 m
Sisäinen paine (Pa)	266	318	Pinta-ala patterin jälkeen	3,7 m ²
Pituus (m)	3,7	3,3	LTO:n hyötysuhde	68,5 %
Korkeus (m)	0,5	0,7	Lämpötila LTO:n jälkeen	16,7 °C
Leveys (m)	1,0	1,0	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,4 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	11,2	11,1	Vuotoilmamäärä luokassa L2	1,2 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	1,3	1,4	Vuotoilmamäärä luokassa L3	3,7 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	3,8	4,2	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	14,2 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	11,4	12,7	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	42,7 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	128,1 kWh/a
SFP-luku	1,342 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	0,9 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	31,5 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	2,6 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	94,5 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	7,7 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	283,4 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	3,1 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	9,4 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	28,3 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 6				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	2	2	Pituus patterin jälkeen	1,7 m
Sisäinen paine (Pa)	436	296	Pinta-ala patterin jälkeen	7,8 m ²
Pituus (m)	4,4	3,4	LTO:n hyötysuhde	54,1 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	14,3 °C
Leveys (m)	1,3	1,3	Vuotoilmamäärä luokassa L1	1,2 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	20,4	15,5	Vuotoilmamäärä luokassa L2	3,7 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	3,2	1,9	Vuotoilmamäärä luokassa L3	11,0 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	9,5	5,6	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	72,5 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	28,6	16,9	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	217,4 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	652,2 kWh/a
SFP-luku	1,653 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	4,3 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	73,1 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	13,0 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	219,3 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	39,1 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	658,0 kWh/a		Jäähdytysjärjestelmän sähköenergiankulutus	
Rahallinen hukka luokassa L1	7,3 €/a		Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Rahallinen hukka luokassa L2	21,9 €/a		Pinta-ala patterin jälkeen	5,1 m ²
Rahallinen hukka luokassa L3	65,8 €/a		Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,8 dm ³ /s
			Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,4 dm ³ /s
			Vuotoilmamäärä luokassa L3	7,1 dm ³ /s
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L1	1,4 kWh/a
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L2	4,1 kWh/a
			Jäähd.sähköenergiaa hukkaan L3	12,2 kWh/a
			Rahallinen hukka luokassa L1	0,21 €/a
			Rahallinen hukka luokassa L2	0,37 €/a
			Rahallinen hukka luokassa L3	2,32 €/a

ILMANVAIHTOKONE 7				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	2	2	Pituus patterin jälkeen	1 m
Sisäinen paine (Pa)	379	331	Pinta-ala patterin jälkeen	4,6 m ²
Pituus (m)	3,9	3,3	LTO:n hyötysuhde	74,8 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,8 °C
Leveys (m)	1,3	1,3	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,7 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	17,2	14,4	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,0 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,4	1,9	Vuotoilmamäärä luokassa L3	5,9 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	7,3	5,6	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	15,2 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	22,0	16,9	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	45,5 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	136,5 kWh/a
SFP-luku	1,053 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	0,9 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	39,8 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	2,7 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	119,5 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	8,2 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	358,4 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	4,0 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	11,9 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	35,8 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 8				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	2,2	2,2	Pituus patterin jälkeen	1 m
Sisäinen paine (Pa)	352	315	Pinta-ala patterin jälkeen	4,6 m ²
Pituus (m)	3,9	3,4	LTO:n hyötysuhde	51 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	13,8 °C
Leveys (m)	1,3	1,3	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,6 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	17,9	15,5	Vuotoilmamäärä luokassa L2	1,9 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,4	2,0	Vuotoilmamäärä luokassa L3	5,6 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	7,3	5,9	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	40,5 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	21,9	17,6	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	121,4 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	364,3 kWh/a
SFP-luku	1,656 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	2,4 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	63,6 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	7,3 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	190,7 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	21,9 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	572,0 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	6,4 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	19,1 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	57,2 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 9				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	2,9	2,7	Pituus patterin jälkeen	1,1 m
Sisäinen paine (Pa)	387	329	Pinta-ala patterin jälkeen	5,7 m ²
Pituus (m)	4,0	3,4	LTO:n hyötysuhde	73,1 %
Korkeus (m)	1,0	1,0	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,5 °C
Leveys (m)	1,6	1,6	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,8 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	20,0	17,2	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,5 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,9	2,2	Vuotoilmamäärä luokassa L3	7,4 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	8,6	6,7	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	21,6 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	25,9	20,1	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	64,9 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	194,7 kWh/a
SFP-luku	1,295 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	1,3 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	58,0 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	3,9 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	173,9 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	11,7 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	521,8 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	5,8 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	17,4 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	52,2 €/a			

ILMANVAIHTOKONE 10				
	Tuloilma	Poistoilma	Lämmitysenergiankulutus	
Ilmavirta (m ³ /s)	4,2	3,8	Pituus patterin jälkeen	1 m
Sisäinen paine (Pa)	316	241	Pinta-ala patterin jälkeen	5,8 m ²
Pituus (m)	4,0	3,8	LTO:n hyötysuhde	73,2 %
Korkeus (m)	1,3	1,3	Lämpötila LTO:n jälkeen	17,5 °C
Leveys (m)	1,6	2,5	Vuotoilmamäärä luokassa L1	0,7 dm ³ /s
Vaippa pinta-ala (m ²)	21,2	27,3	Vuotoilmamäärä luokassa L2	2,2 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L1 (dm ³ /s)	2,7	2,9	Vuotoilmamäärä luokassa L3	6,6 dm ³ /s
Vuotoilmamäärä L2 (dm ³ /s)	8,0	8,7	Lämmitysenergiaa hukkaan L1	19,1 kWh/a
Vuotoilmamäärä L3 (dm ³ /s)	24,1	26,1	Lämmitysenergiaa hukkaan L2	57,4 kWh/a
Sähköenergiankulutus			Lämmitysenergiaa hukkaan L3	172,2 kWh/a
SFP-luku	1,135 kW/(m ³ /s)		Rahallinen hukka luokassa L1	1,1 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L1	55,5 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L2	3,4 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L2	166,5 kWh/a		Rahallinen hukka luokassa L3	10,3 €/a
Sähköenergiaa hukkaan L3	499,4 kWh/a			
Rahallinen hukka luokassa L1	5,5 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L2	16,6 €/a			
Rahallinen hukka luokassa L3	49,9 €/a			